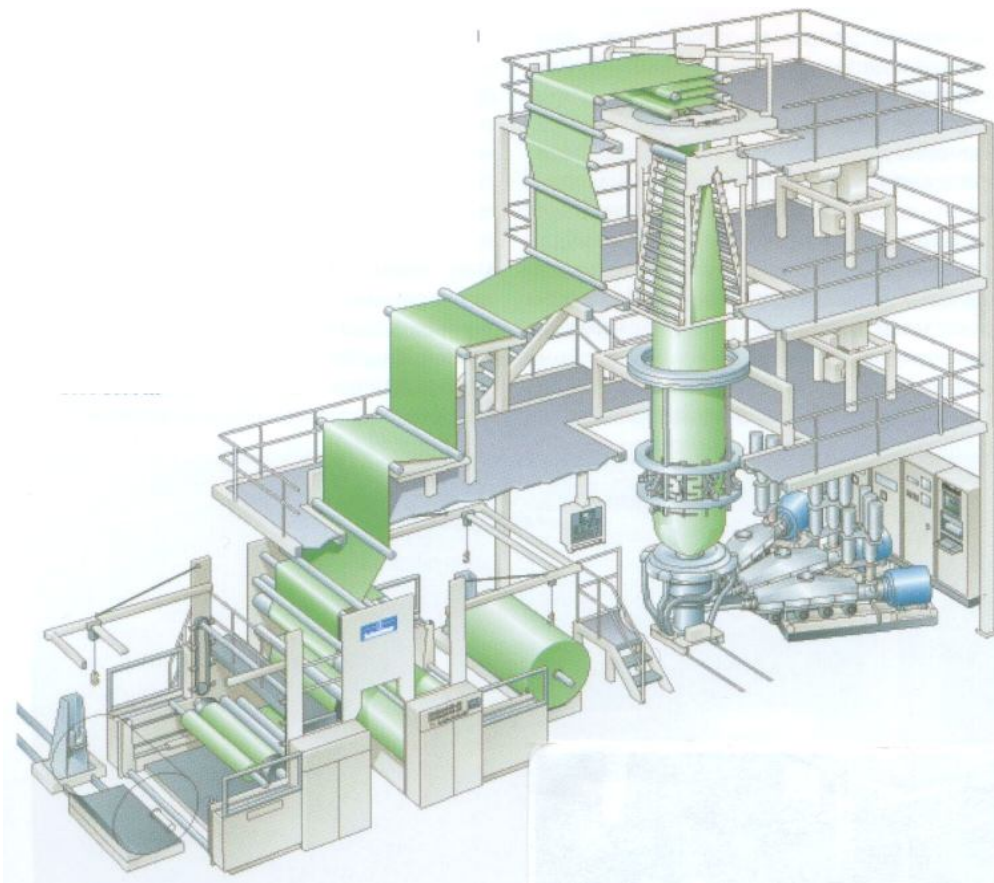


О.В. Суберляк, П.І. Баштанник

ТЕХНОЛОГІЯ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ ТА КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ



Львів – Дніпропетровськ – 2006

УДК 678.6/7 : 678.05

Суберляк О.В., Баштанник П.І.

Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів. – Київ.: 2006. - 270 с.

У підручнику подано технології переробки полімерних матеріалів у виробі найбільш поширеними у промисловості високопродуктивними методами: екструзії, лиття під тиском, екструзії з наступним роздувом, термоформування тощо. Показано вплив основних технологічних параметрів процесів переробки на якість готових виробів, наведено оптимальні умови переробки та шляхи інтенсифікації технологічних процесів. Розглянуто фізико-хімічні основи переробки пластмас у виробі, основи технології переробки та використання полімерних композиційних матеріалів.

Підручник призначений для студентів вищих навчальних закладів бакалаврського та магістерського рівня за напрямом “Технологія полімерних та композиційних матеріалів”. Він може бути також корисний інженерно-технічним робітникам промисловості переробки пластмас, працівникам науково-дослідних інститутів, проектних організацій.

270 с., 180 рис., 60 табл, список літератури 74 джерела.

Рецензенти:

Завідувач кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету “Київський політехнічний інститут”, д.т.н., проф., академік АІН України, лауреат Державної премії України **Свідерський В.А.**

Професор кафедри хімії та хімічної технології високомолекулярних сполук Дніпропетровського національного університету, д.т.н., академік АІН України **Спорягін Е.О.**

Гриф надано Міністерством Освіти і науки України
(лист № від 2006 р.)

ISBN

Суберляк О.В., Баштанник П.І., 2006

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	6
1. КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ З ПЛАСТМАС	9
2. ПІДГОТОВКА ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ ДО ПЕРЕРОБКИ	11
2.1. Подрібнення	12
2.1.1. Методи подрібнення	12
2.2. Просіювання	15
2.3. Усереднення (укрупнення) партій	15
2.4. Підсушування	16
2.5. Зволоження	16
2.6. Змішування	17
2.6.1. Диспергування	18
2.6.2. Змішування (пластикація) полімерів на вальцах	19
2.7. Розчинення	21
2.8. Фарбування	22
3. ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ ПЕРЕРОБКИ ПЛАСТМАС	23
3.1. Температурно-часовий інтервал переробки полімерів	26
3.2. Текучість і її використання під час розробки технології переробки полімерів	28
3.2.1. Суть методів визначення текучості	29
3.2.2. Визначення текучості за Рашигом	30
3.2.3. Вплив текучості на якість виробів і конструктивні особливості обладнання	31
3.3. Вибір методу переробки полімерів	32
3.4. Технологічні властивості термопластів	32
4. ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ З ТЕРМОПЛАСТІВ	34
4.1. Технологія формування методом лиття під тиском	34
4.1.1. Різновидності процесів лиття під тиском	36
4.1.2. Вироби, які виготовляються литтям під тиском	43
4.1.3. Матеріали. Вимоги до пластмас, які переробляються литтям під тиском	43
4.1.4. Технологія лиття під тиском термопластів	45
4.1.5. Процеси, які супроводжують цикл формування, і їх вплив на якість виробів при литті під тиском	51
4.1.6. Технологічні параметри лиття під тиском термопластів	57
4.1.7. Вплив технологічних параметрів на якість виробів і продуктивність технологічного процесу	64
4.1.8. Види браку при литті під тиском та шляхи його усунення	66
4.2. Технологія формування порожнистих виробів із замкнутим об'ємом	66
4.2.1. Метод екструзійного видування	68
4.2.2. Технологія формування методом литтєвого видування	79
4.2.3. Технологія ротаційного формування виробів	85
4.3. Технологія формування виробів з листових матеріалів. Термоформування	89
4.3.1. Фізико-хімічні основи процесу	90
4.3.2. Вимоги до матеріалів та заготовки	91
4.3.3. Характерні особливості технології пневмоформування	92
4.3.4. Основні способи термоформування	95

4.3.5. Технологія формування виробів термоформуванням	98
4.4. Технологія формування погонажних виробів методом екструзії	101
4.4.1. Загальні поняття.....	101
4.4.2. Загальна характеристика екструзії.....	103
4.4.3. Технологія формування плівок екструзійним методом	110
4.4.4. Виготовлення комбінованих (двошарових) плівок (дублювання).....	135
4.4.5. Види браку при екструзії плівок, його причини і способи усунення	136
4.4.6. Технологія одержання листів методом екструзії.....	136
4.4.7. Технологія виробництва полімерних труб методом екструзії	140
4.4.8. Допоміжні екструзійні процеси	149
4.4.9. Аутотермічна екструзія	152
4.5. Технологія формування погонажних виробів методом вальцювання та каландрування	163
4.5.1. Загальні поняття.....	163
4.5.2 Технологія та умови каландрування	164
5. ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ З РЕАКТОПЛАСТІВ	171
5.1. Технологія виготовлення виробів пресуванням.....	171
5.1.1. Компресійне пресування	172
5.1.2. Литтєве пресування	195
5.1.3. Пряме пресування з декоруванням та двоколірне пресування	200
6. ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ РЕАКТОПЛАСТІВ	203
6.1. Особливості лиття під тиском реактопластів	204
6.2. Основні стадії лиття РП і технологічні параметри.....	204
6.2.1. Практична методика встановлення технологічного режиму лиття РП	206
6.3. Види браку при литті під тиском реактопластів	207
7. ТЕХНОЛОГІЯ ПЕРЕРОБКИ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	208
7.1. Основи створення полімерних композиційних матеріалів	209
7.1.1. Класифікація полімерних композиційних матеріалів	209
7.2. Поверхневі явища на межі розподілу фаз в композитах	211
7.3. Основи технології переробки та використання полімерних композиційних матеріалів	221
7.3.1. Склопластики	221
7.3.2. Вуглепластики	227
7.4. Технологія виготовлення виробів з армованих пластиків	232
7.4.1. Теоретичні основи зміцнення полімерів армуванням	234
7.4.2. Методи формування виробів та стадії технологічного процесу переробки армованих пластиків	237
7.4.3. Основні методи формування виробів.....	238
8. ТЕХНОЛОГІЯ ВІДЛИВАННЯ (ЛИТТЯ БЕЗТИСНЕВЕ).....	242
8.1. Відливання звичайне. Формування виробів на основі епоксидних композицій	242
8.2. Формування виробів з композицій на основі ненасичених поліестерних смол.....	247
8.3. Методи полімеризаційного формування виробів з термопластів.....	249
8.3.1. Формування полімеризаційне з поліуретанів	249
8.4. Технологічний процес формування виробів з поліуретанів	252
8.5. Формування полімеризаційне з поліаміду.....	255
ЛІТЕРАТУРА	260

	5
ДОДАТКИ	263
ДОДАТОК 1.....	264
ДОДАТОК 2.....	265
ДОДАТОК 3.....	265
ДОДАТОК 4.....	266
ДОДАТОК 5.....	267
ДОДАТОК 6.....	1
ДОДАТОК 7.....	2
ДОДАТОК 8.....	1
ПРО АВТОРІВ.....	2

ПЕРЕДМОВА

Зростання виробництва пластмас і їх поширення, практично, в усіх галузях народного господарства є наслідком науково-технічного прогресу.

Великий інтерес до пластичних мас викликаний не тільки їх своєрідними технічно вигідними властивостями (низька питома густина, висока хімічна стійкість, наявність високоеластичного стану тощо) виготовлення виробів з пластмас відзначається низькою трудомісткістю, енергомісткістю, доступністю вихідної сировини. На виготовлення пластмасового виробу потрібно витратити в $2,5 \div 4$ рази менше праці, ніж на виготовлення аналогічного виробу з металу, і при цьому споживається в $3 \div 5$ разів менше енергії.

Впровадження в народному господарстві пластмас і композиційних полімерних матеріалів (скло-, вугле- та органопластиків) відзначається високою економічною ефективністю.

Виготовлення виробів з пластмас зосереджене на підприємствах чи ділянках з переробки пластмас, які об'єднані в одну підгалузь – технології переробки пластмас. За методами виготовлення виробів з пластмас її можна поділити на такі групи виробництв з індивідуальною об'ємною часткою:

- лиття під тиском термопластів – 33 %;
- екструзія – біля 30 %;
- пресування – 26 %;
- каландрування – 5 %;
- інші методи – 6 %.

Основну масу погонажних виробів (труби, плівки, листи, профілі тощо) одержують методом екструзії. За технологією вальцювання і каландрування отримують значний асортимент плівок (плівки загального призначення, морозостійкі, багатошарові, комбіновані тощо) і рулонні матеріали.

Продукцію, одержану методом екструзії, широко використовують у народному господарстві як вироби самостійного призначення або як напівфабрикат для виготовлення виробів іншими методами. Наприклад, листи використовують або безпосередньо як облицювальний та футерувальний матеріал, або для виготовлення виробів термоформуванням, вирублюванням тощо. Екструзійні методи переробки пластмас набувають значного поширення як допоміжний спосіб неперервного пакування промислових та харчових виробів у полімерну оболонку, вони також перспективні при нанесенні електро-, хімізоляції на провідники тощо. Перевага екструзійних процесів – неперервність виробництва, велика одинична потужність, висока технологічність при низькому рівні технологічних відходів, можливість автоматизації процесу і створення замкнених циклів, керованих за допомогою ЕОМ. Вироби з пластмас, які отримують методом екструзії, належать до матеріалоємної продукції. Сировина і матеріали для їх одержання становлять 80 % загальних затрат, на електроенергію припадає лише 10 % і на трудозатрати – до 5 %. Всі ці переваги, а також велике практичне значення погонажних виробів і практично необмежений їх асортимент зумовили випереджаючі темпи зростання частки полімерних виробів в загальному обсязі випуску виробів з пластмас.

Сировиною для виготовлення погонажних виробів є термопласти: поліолефіни, полівінілхлорид, полістирольні пластики. Значно розширилась матеріальна база виробництва їх в Україні з введенням до ладу поліпропіленового заводу в м. Лисичанськ та заводу з виготовлення надвисокомолекулярного поліетилену і поліпропілену в м. Калуш, який збудувала німецька фірма “Лінде”. Створення прогресивних методів переробки пластмас у вироби та інтенсифікація існуючих – мета галузі переробки пластмас.

Аналізуючи тенденції розвитку промисловості, можна виділити перспективні напрямки розвитку підгалузі:

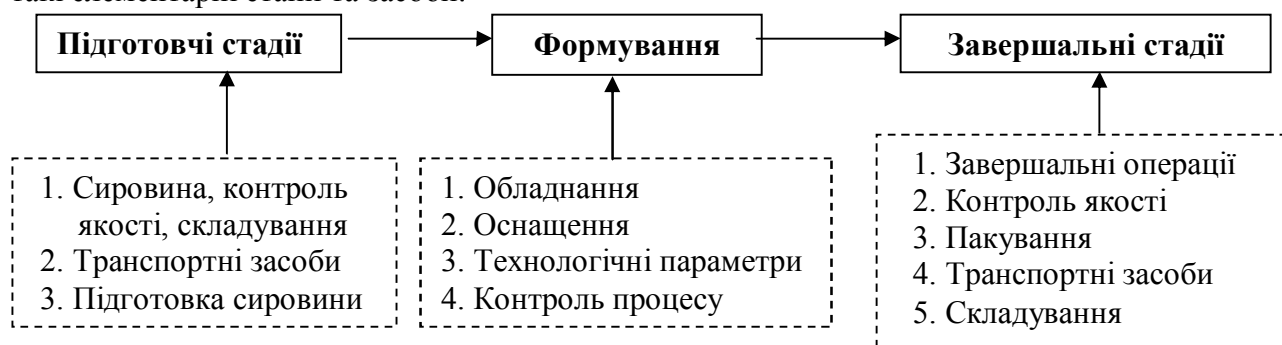
1. Повне технічне переозброєння, реконструкція діючих виробництв.
2. Випереджаючий розвиток хімічного машинобудування для створення нового обладнання із широким використанням ЕОМ, робототехніки і засобів автоматизації.
3. Освоєння нових, високоефективних технологічних процесів, які б забезпечували комплексне й економне використання сировини і зниження (або повну відсутність) забруднення навколишнього середовища. Створення безвідходних, екологічно чистих технологій.
4. Розробка і впровадження автоматизованих технологічних ліній, автоматичних систем управління, комплексна механізація виробничого процесу.
5. Широке використання для проектування обладнання і створення технологічних процесів ЕОМ, систем автоматичного проектування.

Вирішення поставлених завдань великою мірою залежить від кваліфікаційного рівня спеціалістів, керівників технологічних процесів, технологів та конструкторів.

Рівень їх підготовки значно залежить від якості вивчення студентами дисципліни "Технологія виготовлення виробів з пластмас і композиційних матеріалів". Мета цього курсу – ознайомити студентів з теоретичними і практичними питаннями виготовлення виробів із пластмас і композиційних матеріалів з потрібним комплексом властивостей найбільш поширеними високопродуктивними методами, методами регулювання технологічними процесами та їх удосконаленням.

Що ж означає слово „технологія”? У перекладі з давньогрецької – це майстрування. Майстрування, яке приводить до отримання необхідного виробу із вихідної сировини. В більш повному, загальному розумінні технологія – реалізація технологічного процесу, який складається із цілого ланцюга послідовних стадій (операцій), від отримання і підготовки сировини до пакування готових виробів. Технологічний процес здійснюють в конкретних технологічних умовах (режимах) з використанням відповідного обладнання, оснащення та допоміжного устаткування.

Отже, для реалізації технологічного процесу виготовлення виробу з пластмас необхідні такі елементарні етапи та засоби:



Які ж функції інженера-технолога в організації технологічного процесу?

На виробництві інженер-технолог з переробки пластмас виконує такі функції:

- розробляє і впроваджує у виробництво технологічні процеси виготовлення нової продукції;
- забезпечує умови виготовлення виробів з наперед заданими конструкцією і властивостями;
- здійснює контроль сировини, проводить визначення її реальних технологічних характеристик;
- вибирає оптимальні режими переробки та технологічного процесу (за стадіями);

- контролює перебіг технологічного процесу і вносить корективи для забезпечення необхідної якості виробу;
- проводить контроль кінцевої продукції і оперативно висуває заходи впливу на технологічний процес при відхиленні заданих характеристик виробу;
- підвищує якість виробу, розробляє заходи щодо інтенсифікації процесу, його автоматизації, економії сировини та матеріалів;
- вирішує екологічні питання, розробляє рекомендації та втілює в життя пропозиції щодо безвідходних, екологічно чистих технологій.

1. КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ З ПЛАСТМАС

Нині відомо кілька десятків основних і спеціалізованих методів виготовлення виробів з пластмас. Кожен метод – це шлях здійснення технології виготовлення виробу з полімерного матеріалу, який визначається кількома факторами.

По-перше, він визначається класом полімеру. Існує два класи полімерів; термопласти і реактопласти. Одержання виробів із реактопластів (фіксування їх форми) супроводжується фізичними і хімічними процесами (реакціями утворення тривимірного полімеру – затвердженням). У результаті реактопласт переходить у нерозчинний стан, тобто він не топиться. Переробка ж термопластів супроводжується лише фізичними процесами. Форма виробу з термопласту фіксується за рахунок охолодження нижче температури склування (чи кристалізації) розтопу. Під час нагрівання вище температури текучості термопласти здатні знову переходити зі склоподібного (твердого) у в'язкотекучий стан без суттєвої зміни хімічної структури. Отже, відходи термопластів можна переробляти у вироби з незначним погіршенням їх властивостей.

По-друге, метод переробки полімеру визначається фізичним станом, у якому перебуває полімер в момент виготовлення виробу: склоподібному (холодне пресування, вирубка тощо), високоеластичному (термоформування), в'язкотекучому (лиття, пресування, екструзія тощо). При формуванні виробів полімери найчастіше перебувають у в'язкотекучому (в'язкопластичному) чи в перехідному (від високоеластичного до в'язкотекучого) стані, а в процесі експлуатації – у склоподібному чи кристалічному або ж у високоеластичному.

По-третє, метод виготовлення виробів з пластмас залежить від їх конфігурації і габаритів. Наприклад, порожнинні ємності одержують екструзією з подальшим роздувом, а дуже об'ємні – ротаційним формуванням.

Отже, метод переробки можна ще подати як загальну, принципово особливу технологію, що об'єднує однотипність технологічного процесу, обладнання, оснащення і матеріалу.

Мак-Келві об'єднав різні методи виготовлення виробів з термопластів у типові групи (рис. 1.1).

Перша група охоплює методи виготовлення виробів з пластмас, у яких формування виробів відбувається при високих швидкостях зсуву полімеру, який перебуває у в'язкотекучому стані, з подальшим його охолодженням.

Друга група характеризується спільними дифузійно-адгезійними процесами.

Третя група методів виготовлення виробів з пластмас об'єднує методи їх формування з розчину.

До четвертої групи віднесено методи виготовлення спінених виробів з термопластів.

Для всіх методів п'ятої групи характерні хімічні реакції утворення полімеру, які суміщаються з формування виробу у формі.

Шоста група містить методи, які можуть бути як самостійними, так і завершальними стадіями основного технологічного процесу. Це – методи термоформування. Вони здійснюються, коли полімер перебуває у високоеластичному стані.

В одну класифікаційну схему поєднані і методи переробки реактопластів (рис. 1.2). В усіх методах сьомої групи формування виробу здійснюється за рахунок течії під дією напруження зсуву прес-матеріалу, який перебуває у в'язкопластичному стані, та наступного затвердження (структурування) зв'язного. Отже, всі методи виготовлення виробів з реактопластів, які об'єднані в сьому групу, характеризуються спільними фізико-хімічними процесами, що протікають при переробці.

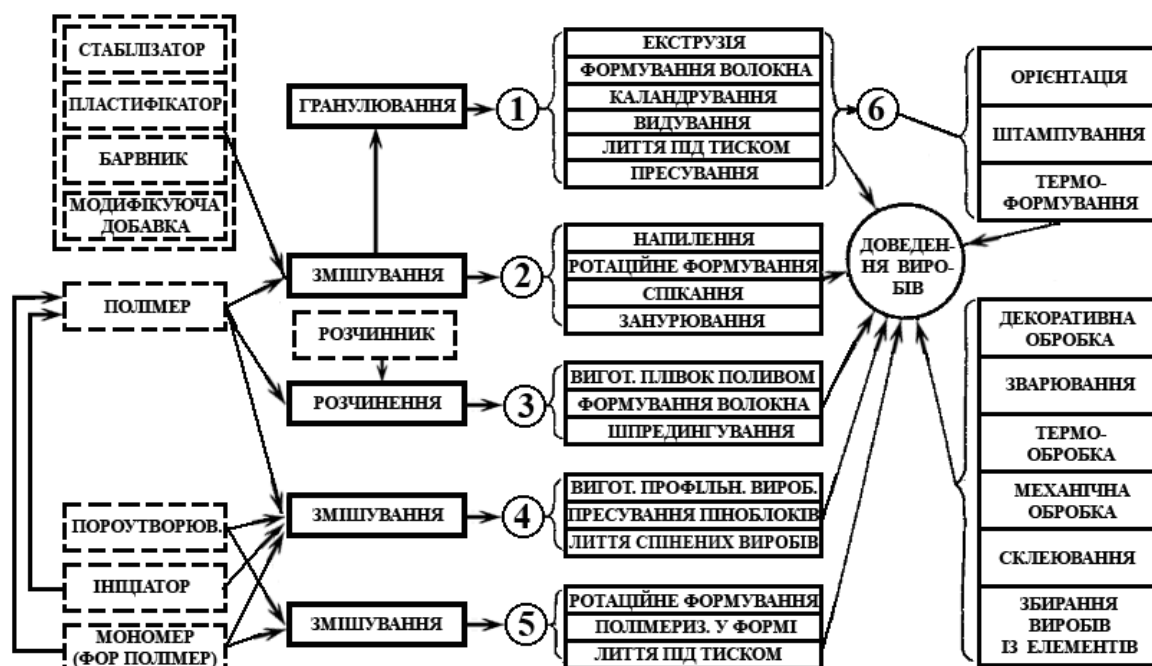


Рис. 1.1. Класифікація методів виготовлення виробів з термопластів

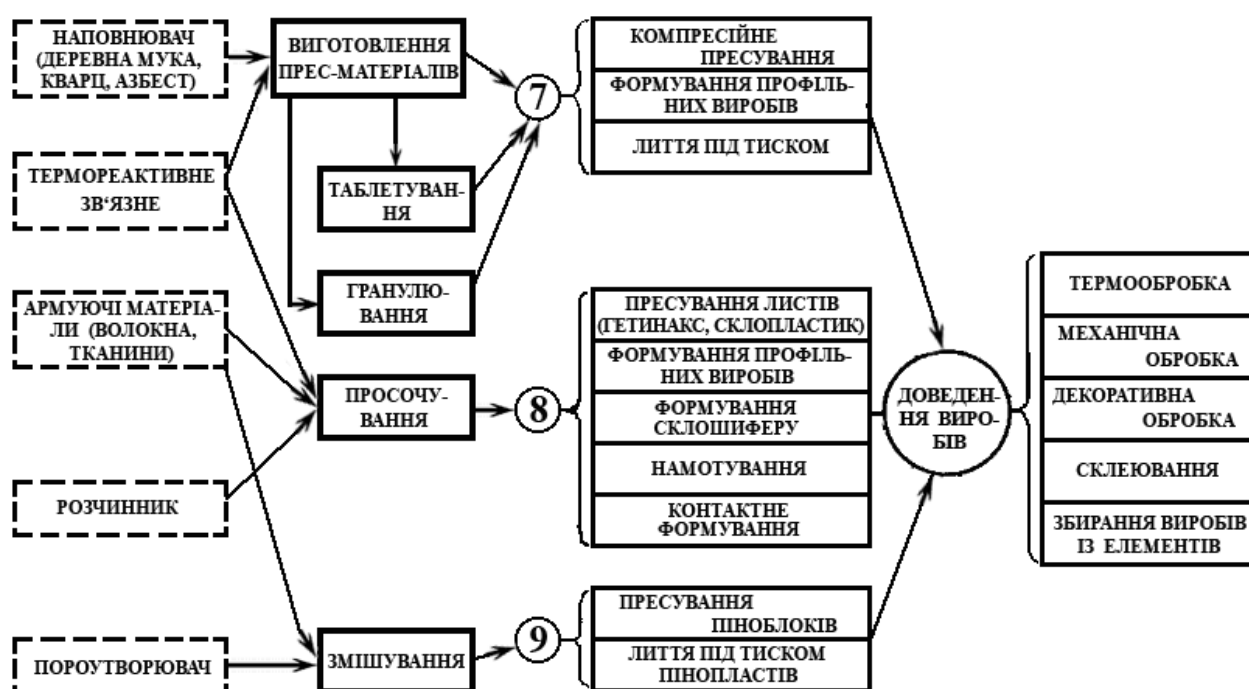


Рис. 1.2. Класифікація методів виготовлення виробів з реактопластів

У восьму групу виділені методи переробки армованих пластиків, а в дев'яту – методи виготовлення спінених виробів з реактопластів.

Існує також класифікація методів виготовлення виробів з пластмас, яка розроблена при складанні типових технологічних процесів і полягає в розділенні методів виготовлення виробів за вихідними матеріалами; технологічними стадіями, що виконуються при їх здійсненні; технологічними режимами; оснащенням і обладнанням, яке використовується тощо.

2. ПІДГОТОВКА ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ ДО ПЕРЕРОБКИ

Пластичні маси – матеріали, що одержують на основі природних і синтетичних полімерів, а також цілого ряду додатків різного призначення, які внаслідок своєї пластичності під дією теплоти і тиску можуть набувати і зберігати у виробі надану їм форму. Отже, пластмаси – складні композиції різноманітних хімічних речовин, основою яких є полімер або суміш полімерів.

Вивчаючи цей розділ, студенти повинні зрозуміти, що полімер (основа пластмаси) визначає технологію, умови переробки та основні експлуатаційні властивості виробів з пластмас. Наприклад, реактопласти, як правило, характеризуються вищими, ніж у термопластів, показниками твердості, модуля пружності, теплостійкості, нижчими значеннями температурних коефіцієнтів лінійного та об'ємного розширення.

Найбільш поширені неполімерні компоненти пластмас – це наповнювачі, пластифікатори, стабілізатори, зшиваючі агенти, структуроутворювачі, мастила, барвники, антипірени, антистатика й антисептики тощо.

Наповнювачі вводять для покращення механічних властивостей пластмас, зменшення усадки, надання полімерному матеріалу інших цінних експлуатаційних властивостей, а також для зниження вартості виробів. Активні наповнювачі значно покращують експлуатаційні властивості полімерних матеріалів, а інертні, не змінюючи практично властивостей пластмас, зменшують їх вартість. Наповнювачами можуть бути тверді, рідкі та газоподібні речовини неорганічної та органічної природи, які рівномірно розподіляються в об'ємі композиції і мають чітку межу поділу з полімером. Тверді наповнювачі поділяють на порошкоподібні, зернисті, волокнисті та листові. Термопласти найчастіше містять 15 ÷ 40 %, а реактопласти – 30 ÷ 80 % наповнювачів. Із порошкоподібних наповнювачів найбільш поширені деревна мука, крейда, каолін, тальк, слюда, а серед армуючих – скляні, вуглецеві, органічні та металеві волокна.

Пластифікатори вводять в пластмаси для підвищення їх еластичності та пластичності при переробці та експлуатації. Пластифікація полегшує формування виробів, знижуючи температуру переробки пластмас, а також змішування полімеру з іншими компонентами композиції, підвищує морозостійкість виробів. Пластифікатори – це, в основному, аліфатичні етери фталевих, ортофосфорних кислот, або ж олігомерні поліетери, наприклад, – діоктилфталат, трикрезилфосфат, трибутерин тощо.

У процесі виготовлення та експлуатації виробів з пластмас відбувається процес старіння, що призводить до погіршення їх фізико-механічних та інших експлуатаційних властивостей.

Стабілізатори – речовини, які вводять в пластмаси для підвищення стійкості виробів до дії різних факторів (теплоти, радіації, кисню, озону тощо) в умовах переробки, зберігання й експлуатації. Найбільш поширені стабілізатори – це антиоксиданти, антиозонанти та світлостабілізатори пластмас, а також інгібітори деструкції.

Зшиваючі агенти використовують в полімерних композиціях для зшивання на певних стадіях переробки лінійних макромолекул у тривимірну сітку. Затвердження – процес взаємодії реакційноздатних груп олігомерів чи лінійних макромолекул між собою, чи із затверджувачами. Серед найважливіших затверджувачів, ініціаторів і каталізаторів затвердження пластмас – це уротропін, поліетиленполіамін, пероксиди, для еластомерів – сірка.

Як зазначалося вище, процес виготовлення виробів з пластмас складається з таких етапів: підготовка полімерної композиції із заданими властивостями; переведення її в стан, у якому вона легко набуває необхідну форму; формування виробу; фіксування його форми; завершальні операції з метою надання товарного вигляду виробові.

До підготовчих стадій, у першу чергу, відносять: подрібнення, просіювання, усереднювання партій, підсушування (зволоження), розчинення, змішування, таблетування, вальцювання, гранулювання. Всі ці стадії спрямовані на підготовку сировини з метою полегшення перебігу й інтенсифікації основного процесу формування виробу з необхідним комплексом властивостей. Розглянемо коротко кожен із цих стадій.

2.1. Подрібнення

При виготовленні виробів з пластмас використовують дрібнодисперсну сировину (у вигляді гранул розміром $1,5 \div 5$ мм або технологічного порошку з розміром частинок $0,5 \div 2$ мм). У вигляді гранул переробляються практично всі термопласти, а у вигляді порошку – прес-порошки з реактопластів. З розвитком техніки набуває розповсюдження гранульований прес-матеріал. Одержує поширення також порошкова технологія переробки термопластів. У сучасній технології щораз частіше використовується сировина у вигляді тонкодисперсного порошку з розміром частинок ≈ 50 мкм.

Якщо термопласт у вигляді порошку можна одержати під час синтезу полімеру (емульсійна, йонна і лакова полімеризація з наступним осадженням), то в процесі синтезу реактопластів зв'язне має вигляд моноліту, який необхідно подрібнювати.

Подрібнення використовують й при переробці вторинної сировини (подрібнених відходів виробництва). На сьогоднішній день встановлені норми додатку вторинної сировини до основної в кількості від 5 до 30 %. Цей захід дає значну економію матеріалів. Він також спрямований на створення безвідходних технологій, що зменшує забруднення навколишнього середовища.

Отже, залежно від вимог, які ставлять до сировини, вибирають метод подрібнення і підбирають необхідне обладнання.

2.1.1. Методи подрібнення

2.1.1.1. Гранулювання – відбувається при:

- а) отриманні гранул при суспензійній полімеризації;
- б) перетисканні розтопу полімеру з колони синтезу через фільтр і подрібнення утворених прутків ножовою дробаркою (цей метод здійснюється при блоковій полімеризації неперервним методом);
- в) гранулюванні за допомогою екструзійної установки.

У випадку гранулювання „на гаряче”, коли гранулювання відбувається без попереднього охолодження, використовують комбіновану головку, котра виконує функції екструзії прутків, гранулювання і охолодження гранул за рахунок подавання на неї холодної води. Схема такої головки приведена на рис. 2.1. Вода подається під тиском через вал роторно-ножової дробарки до крильчатки.

Гранулювання “на гаряче” можна здійснювати за рахунок струменю води, котрий перетинає прутки полімеру, які знаходяться у в'язкотекучому стані. Вода в цьому випадку подається під високим тиском тонкою струминою, перпендикулярно до напрямку екструзії в каналах полімерних прутків (рис. 2.2).

2.1.1.2. Механічні методи отримання технологічних порошків

Механічне подрібнення економічно вигідне при одержанні порошків з розміром частинок $0,5 \div 2$ мм (крупнозернистих). Розмір частинок, добутих таким методом при кімнатній температурі, обернено пропорційно залежить від крихкості полімеру.

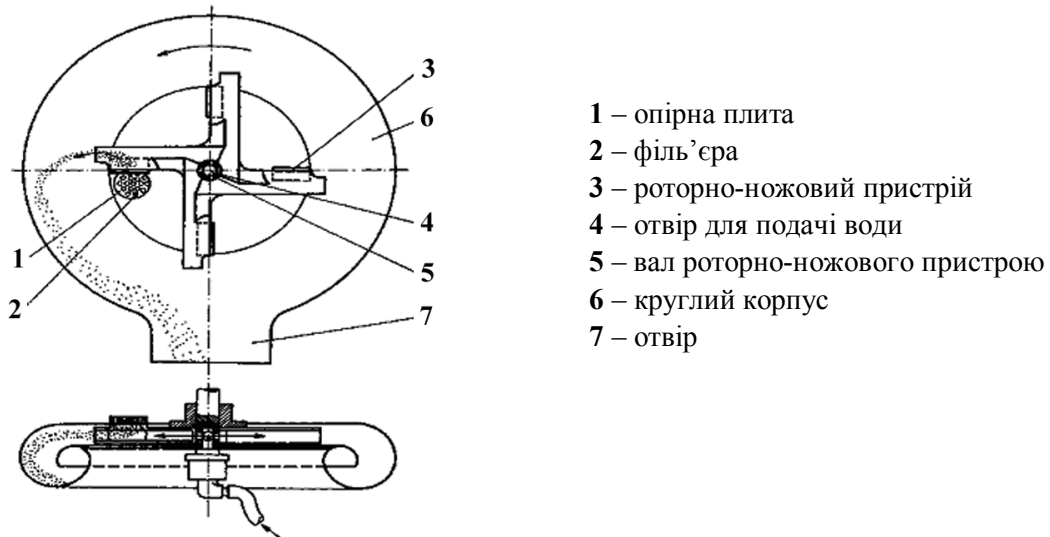


Рис. 2.1. Схема грануляторної головки з водяним охолодженням для грануляції екструзійним методом термопластів

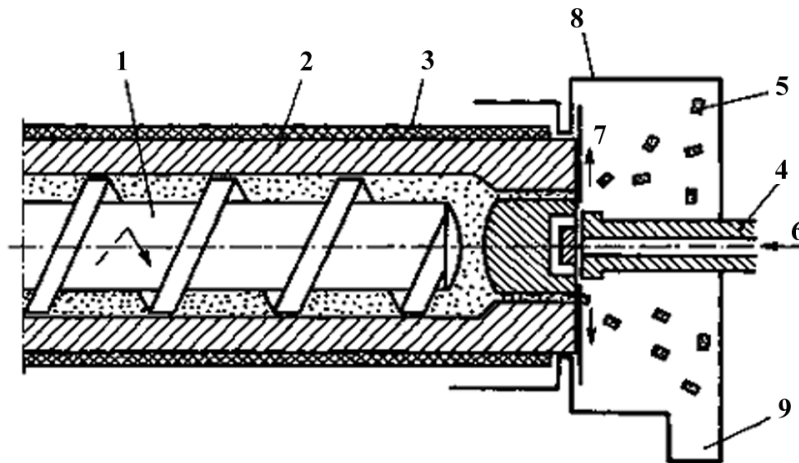


Рис. 2.2. Схема екструзійної грануляції „на гаряче” з використанням води для нарізання, охолодження і транспортування гранул:

1 – шнек; 2 – циліндр; 3 – нагрівачі електричні; 4 – штуцер для подачі води під тиском; 5 – гранули; 6 – напрям потоку води; 7 – напрям струмینی води для нарізання гранул; 8 – корпус; 9 – відведення гранул

Корисна робота, яка витрачається на подрібнення (на об'ємну деформацію кусків матеріалу, який піддається подрібненню і на утворення нової поверхні), згідно рівняння Ребіндера дорівнює:

$$A = A_g + A_n, \quad (2.1)$$

Робота на деформування визначається із залежності:

$$A_g = k \cdot \Delta V = k_1 \cdot D_{cp}^3, \quad (2.2)$$

де: k – коефіцієнт пропорційності, який дорівнює одиниці об'єму твердого тіла; ΔV – зміна об'єму (деформація об'єму); D_{cp} – середній розмір куска до подрібнення.

Робота на утворення нової поверхні при руйнуванні куска дорівнює:

$$A_n = \sigma \cdot \Delta F = \sigma_1 \cdot D_{cp}^2, \quad (2.3)$$

де: σ – коефіцієнт, який дорівнює роботі, яка витрачається на утворення одиниці нової поверхні; ΔF – величина новоутвореної поверхні.

У загальному вигляді робота подрібнення дорівнює, виходячи з розміру куска:

$$A = k_p \cdot D_{cp}^m, \quad (2.4)$$

де: m – змінюється від 2 до 3; індекс p – характеризує зусилля подрібнення; k_1 і σ_1 – залежить від ступеня подрібнення.

З виразу 2.1 видно, що коли матеріал крихкий (штивний), то основна робота буде витрачатись на деформування (A_g), у той час як при подрібненні еластичного матеріалу основна робота буде витрачатись на утворення нової поверхні.

Загалом деформаційно-пружні властивості полімеру визначають вибір конструкції дробарки і температурний інтервал подрібнення. Технологічність методу оцінюється питомою роботою, яка витрачається на руйнування матеріалу, а також зміною фізико-механічних властивостей полімеру. Зміна питомої роботи подрібнення від температури носить аномальний характер (особливо для термопластів).

Отже, рис. 2.3, бажаним є температурний режим в точці t'_{opt} , або t_{opt} (нижче хімічної деструкції t_x). Слід зауважити, що t'_{opt} зростає при збільшенні швидкості механічних дій на матеріал.

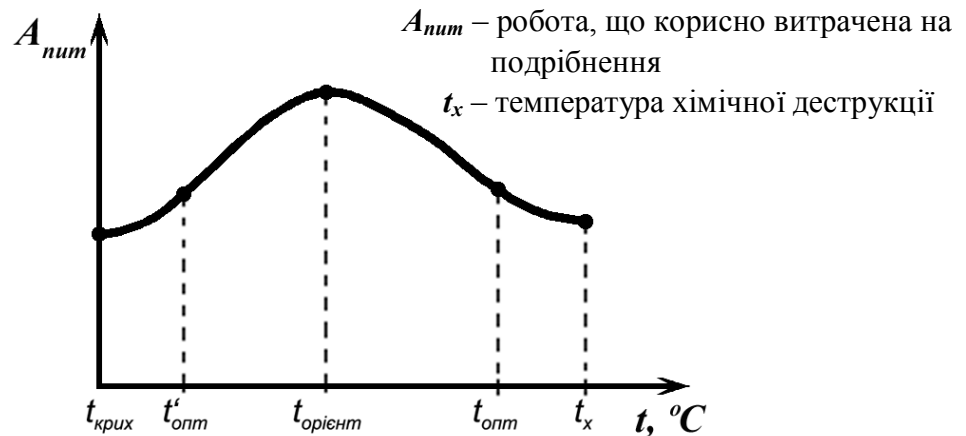


Рис. 2.3. Залежність питомої роботи подрібнення від температури, при якій спостерігається орієнтація полімеру в місці росту генерального дефекту при руйнуванні частинки

Разом з тим, потрібно згадати обернено пропорційну залежність швидкості механодеструкції (яка не бажана) від температури. Враховуючи саме останній факт, можна вважати, що більш вигідною є t_{opt} (температура, що наближається до температури фізико-хімічних перетворень в полімері).

Результат подрібнення оцінюють ступенем подрібнення, який визначається відношенням середнього розміру куска до подрібнення (D_{cp}) до середнього діаметру частинок, одержаних після подрібнення (d_{cp}):

$$I = \frac{D_{cp}}{d_{cp}}, \quad (2.5)$$

$$\text{де: } d_{cp} = \frac{d_1 \cdot a_1 + d_2 \cdot a_2 + \dots + d_n \cdot a_n}{a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i \cdot a_i}{\sum_{i=1}^n a_i},$$

a_1, a_2, \dots, a_n – вміст кожної фракції з розміром d_1, d_2, \dots, d_n .

Подрібнення поділяють за середнім розміром одержаних частинок на:

- крупне ($d_{cp} \cong 1,5 \div 5$ мм)
- тонке ($d_{cp} \cong 0,1 \div 0,5$ мм)
- ультратонке або розмелювання ($d_{cp} \cong 0,01 \div 0,05$ мм).

Для подрібнення використовують молоткові, кульові, щокові, ротаційні дробарки та млини.

2.1.1.3. Отримання тонкодисперсних порошків (100 мкм)

Їх виготовляють:

- а) розпиленням розтопу полімеру в повітряній камері зверху. Недолік такого методу – великі енерговитрати в зв'язку з високою в'язкістю розтопу;
- б) розпиленням дисперсії розтопу полімеру в гарячій воді, отриманій в автоклаві при високих тисках. При перетисканні через сопло такої суміші вода випаровується і утворюється порошок з розмірами частинок $2 \div 6$ мкм. Слід зауважити, що в цьому разі в'язкість системи на $2 \div 3$ порядки менша від в'язкості розтопу;
- в) осадженням полімеру з розчину розчинником, що добре змішується з першим розчинником і не розчиняє полімер. Осадження відбувається при інтенсивному перемішуванні. При такому методі отримують найбільш тонкодисперсну полімерну фазу.

Однак слід зауважити, що зменшення розмірів частинок фази вимагає значного збільшення кількості осаджувача. Приклад промислового осадження – добування полікапроаміду з розчину в соляній кислоті.

При додаванні осаджувача порціями можна провести розділення полімеру на фракції за молекулярною масою – фракціонування.

2.2. Просіювання

Стадія просіювання використовується для:

- відбору фракції полімеру, наповнювача чи зв'язного з необхідним гранулометричним складом;
- очищення подрібненої сировини, наповнювачів від механічних домішок і агломератів.

Агломерат – укрупнена частина сировини з великою густиною і концентрацією. У технології агломератом також називають сировину, отриману після подрібнення відходів виробництва з розміром частин ≥ 5 мм, яка в подальшому надходить на гранулювання; а також гранули з високим вмістом барвника чи іншого додатка. Просіювання здійснюють на ручних чи механічних віброситах, що характеризуються відповідним розміром комірок. Просіяний порошок характеризують коефіцієнтом однорідності:

$$K_o = \sqrt{\frac{\sum n_i}{\sum n_i \cdot V^2}}, \quad (2.6)$$

де: $\sum n_i$ – сума всіх частинок в одиниці об'єму (наприклад, в полі мікроскопа);
 V – розбіжність між розміром частинок з d_i і середнім розміром частинок (B) всього спектру:

$$V = d_i - B, \quad (2.7)$$

$$B = \frac{\sum n_i \cdot d_i}{\sum n_i}, \quad (2.8)$$

2.3. Усереднення (укрупнення) партій

Полімерні матеріали, особливо прес-порошки, можуть поставляти на завод дрібними (по відношенню до маси виробів) партіями. Наприклад, прес-порошок фенопласту випускається партіями масою $0,5 \div 2$ т.

Для полегшення переробки без переналаджування обладнання й оснащення та без зміни технологічного режиму усереднюють партії: змішують декілька партій в змішувачах барабанного типу, після чого аналізують одержану укрупнену партію і встановлюють єдиний технологічний режим переробки для неї.

2.4. Підсушування

При транспортуванні, зберіганні та підготовці сировина поглинає вологу. Тому на виробництві дуже часто проводять підсушування з метою:

- усунення браку, викликаного наявністю води;
- усунення можливості деструкції полімеру (це найбільш важливо для поліестерів, полікарбонатів а також поліамідів);
- покращення монолітності виробу;
- підвищення діелектричних і оптичних характеристик виробу.

Підсушування проводять в режимі, при якому неможливі фізико-хімічні зміни полімеру, і здійснюють в тонкому шарі в стрічкових, тунельних, камерних чи вакуум-барабанних сушарках. Вакуум-сушіння значно прискорює процес і, крім цього, відбувається при нижчих температурах, ніж на повітрі, що дуже важливо для легкогідролізованих полімерів (ПА, ПЕТ, ПК тощо).

Внаслідок гідролізу полімеру зменшується його молекулярна маса, змінюється будова, а, отже, погіршуються реологічні характеристики розтопу, а також зменшується механічна міцність виробу (рис. 2.4, 2.5, 2.6).

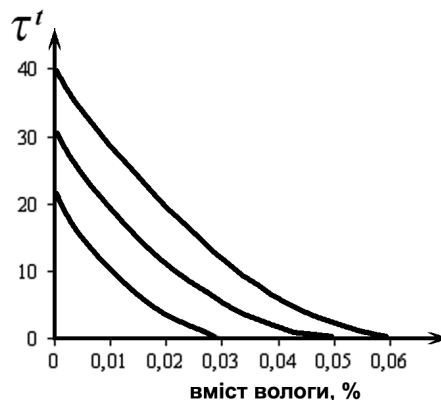


Рис. 2.4. Залежність часу термостабільності розтопу полікарбонату (ПК) від вмісту води. τ^t – час, протягом якого в'язкість розтопу зменшується на 15 %

Вміст води строго регламентований і перебуває в межах 2 ÷ 4 % для прес-матеріалів і 0,01 ÷ 0,5 % для термопластів.

Приклади режимів сушіння деяких пластмас зведені в таблиці 2.1.

Повні умови з урахуванням типу матеріалу наведені в додатку 7.

2.5. Зволоження

В основному стадія зволоження використовується для прес-порошків і спрямована на доведення в'язкості розтопу матеріалу при переробці до необхідної. Досить реакційноздатний прес-матеріал, який містить менше 1,5 % води, відзначається високою в'язкістю, а тому низькою текучістю, в зв'язку із чим при пресуванні можливий брак (недопресування), оскільки не завжди в таких умовах можливе суцільне заповнення порожнини форми під тиском. Для цього сировину зрощують розпиленням струменем або

витримують в парових камерах, після чого уточнюють вміст води і встановлюють відповідний режим переробки. Нормований вміст води в прес-порошках становить $1,5 \div 4 \%$.

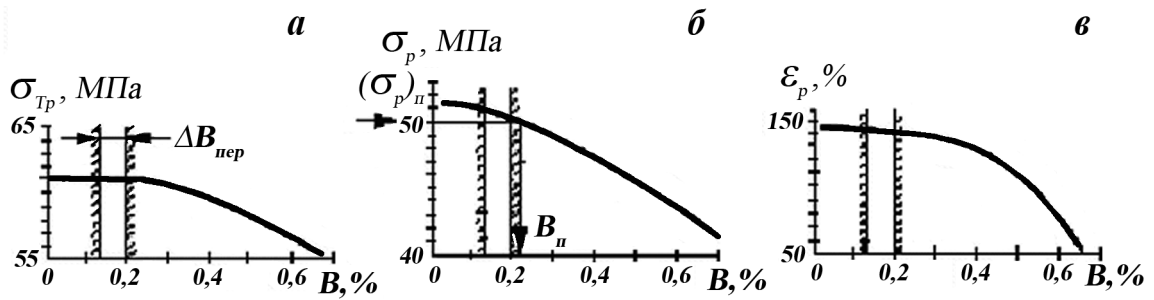


Рис. 2.5. Залежність границі текучості при розтягу σ_{Tp} (а), руйнуючого напруження при розтягу σ_p (б) та відносного видовження при розриві ε_p (в) ПА-610 від вологості матеріалу до переробки, $\Delta B_{пер}$ – інтервал вологості полімеру для переробки

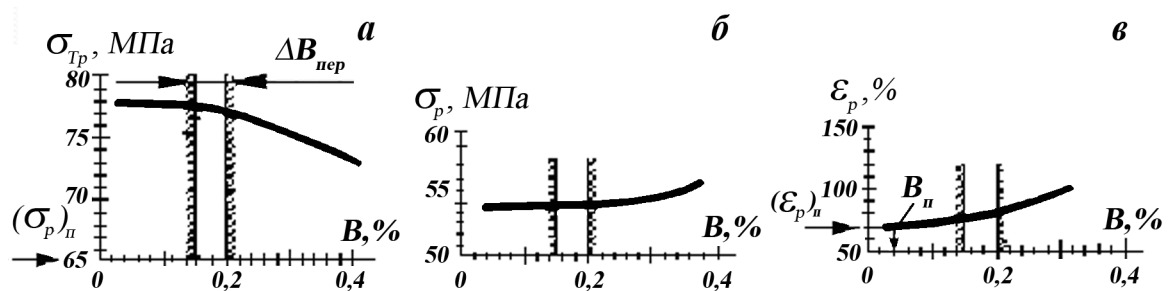


Рис. 2.6. Залежність границі текучості при розтягу σ_{Tp} (а), руйнуючого напруження при розтягу σ_p (б) та відносного видовження при розриві ε_p (в) ПА-6 від вологості матеріалу до переробки

Таблиця 2.1

Параметри сушіння термопластів та допустимі норми води

№ з/п	Матеріал	Найбільший вміст води при 20°C, %	Допустима норма води при переробці, %	Рекомендована температура сушіння, °C	Мінімальний час сушіння, год.
1	АБС-пластик (терполімер)	1,0	0,05 ÷ 0,1	80	1÷2
2	Полюксиметилен (ПОМ)	0,3	0,2	80 ÷ 100	2÷3
3	Поліметилметакрилат (ПММА)	0,3	0,02 ÷ 0,1	60 ÷ 80	5
4	Полівінілхлорид непластиф.	0,3	0,08 ÷ 0,3	60 ÷ 65	1÷2
5	Поліетилентерефталат (ПЕТ)	0,3÷0,4	0,01	70 ÷ 160*	3÷4
6	Поліамід ПА 6	10,5	0,05 ÷ 0,2	75*	4÷5
7	Поліамід ПА 6,6	10	0,05 ÷ 0,2	85*	4÷5
8	Полікарбонат (ПК)	0,15 ÷ 0,5	0,015	120*	2÷3
9	Полісульфон	0,50 ÷ 1,8	0,05	120	2÷3

* – сушіння можливе при розрідженні 10^{-1} атм. і при нижчих температурах (на $10 \div 20$ °C)

2.6. Змішування

В технології переробки пластмас змішування відіграє важливу роль і в багатьох випадках виступає як основна стадія технологічного процесу, від котрої залежить все – режим переробки, якість кінцевого виробу, продуктивність процесу, умови охорони праці та техніки безпеки.

При виготовленні виробів з полімерів змішують полімерну сировину різного типу, різні за структурою полімери з утворенням полімерної суміші, полімерну сировину з барвниками, стабілізаторами та пластифікаторами, первинну полімерну сировину з вторинною, змішують полімерну сировину різних партій, полімери та олігомери з наповнювачами тощо.

Саме процес змішування можна розділити на дві різновидності. Залежно від способу проведення, який визначається видом компонентів та фізико-хімічними процесами, які супроводжують змішування – це змішування сипких матеріалів (механічне перемішування) і диспергування.

Механічне перемішування використовується при змішуванні порошків та гранул. При цьому не спостерігається зміна гранулометричного складу компонентів (розмір та форма частинок не змінюється). Отже, кажуть, що відбувається змішування без зміни розміру фаз. При такому змішуванні не потрібно підвищувати температуру (процес ведуть при кімнатній температурі) і процес не потребує великих механічних зусиль. Основна вимога до конструкцій обладнання та до умов змішування – забезпечення необхідної однорідності одержуваної суміші за оптимальний, бажано найкоротший час.

Друга різновидність – змішування зі зміною розміру фаз або ж диспергування. Такий процес найчастіше проводять тоді, коли полімерна сировина знаходиться у в'язкотекучому або набряклому стані в розчиннику чи в пластифікаторі. Воно найчастіше використовується при одержанні полімерних сумішей, сумішей полімеру з дисперсними наповнювачами чи стабілізаторами, з рідкими пластифікаторами, дисперсними барвниками (радше з концентратами) тощо. До такого типу змішування слід віднести й розчинення полімерної сировини.

Для диспергування, виходячи з умови необхідності зміни розміру фази, а саме необхідності міжструктурного розподілу диспергента в полімерній неперервній фазі (яка, як відомо, характеризується дуже високою в'язкістю), потрібні особливі умови. Це в першу чергу висока температура та великі механічні навантаження на перемішуючий елемент (пристрій), які до того ж обумовлюють значні напруження зсуву. Ці вимоги визначають особливість та тип конструкції обладнання для диспергування і відповідний, властивий для кожного типу полімеру, режим переробки (змішування). Отже, цей спосіб можна віднести вже до стадії переробки полімерів.

2.6.1. Диспергування

Стадію змішування найширше застосовують в технології переробки полімерів, оскільки для виготовлення виробів надзвичайно рідко використовують полімер у чистому вигляді. В основному застосовують композиції на основі полімеру і найрізноманітніших додатків: пластифікаторів, стабілізаторів, наповнювачів, барвників тощо. Дуже часто використовують суміші полімерів з різними властивостями а також газонаповнені полімери.

Розрізняють змішування за видом компонентів:

- а) змішування твердих речовин з рідиною під дією механічних сил (наприклад, введення пластифікатора);
- б) змішування рідин (полімеру у в'язкотекучому стані й доданків) під дією зовнішніх сил і молекулярної дифузії;
- в) змішування двох полімерів у в'язкотекучому стані;
- г) введення газу в полімер, котрий перебуває у в'язкотекучому стані;
- д) змішування полімеру у в'язкотекучому стані з твердими компонентами (наповнювачі, стабілізатори, тощо).

2.6.1.1. Технологічні особливості диспергування

Використовують періодичне й безперервне змішування. Періодичне здійснюють на змішувачах барабанного типу (механічне перемішування сипких компонентів), лопаткових (типу змішувача Бенбері) та на вальцях. Безперервне змішування реалізують на екструдерах, роторно-кулачкових змішувачах і спеціальних вальцях, а також на пневмозмішувачах (в киплячому шарі).

В усіх процесах диспергування спостерігається зміна розмірів фаз, тому його можна полегшити попереднім розмелюванням твердих речовин. Для ефективного диспергування, крім цього, необхідні високі напруження зсуву, відповідна адгезія середовища до фази й суттєво довшою тривалістю змішування.

Для розробки технології змішування (особливо диспергування) використовують такі дані:

1. наявність певної адгезії між інгредієнтами. У випадку відсутності адгезії змішування суттєво ускладнюється і потребує додаткових операцій (наприклад, попереднього розчинення, апретування тощо);
2. стійкість інгредієнтів до температури і механічних впливів, яка обумовлює режим змішування і вибір типу обладнання.

Режим диспергування включає температуру (T), тиск (P), напруження зсуву (F) об'єму фази (V) і час змішування (τ). Безумовно, що підвищення T , P , F призведе до інтенсифікації змішування – $\tau = f(T, P, F)$ – і його ефективності, однак у цьому випадку зростає ймовірність механо- (P , F) і термоокисної (T) деструкції полімеру, що небажано. При змішуванні сипких речовин (полімер) з рідкими (пластифікатор) процес додатково ускладнюється тим, що спочатку спостерігається злипання маси, її комкування й прилипання до стінок змішувача. Для покращення умов змішування в таких випадках використовують лопаткові змішувачі (типу Бенбері). Внаслідок руху лопаток маса переміщується в просторі і зіскрібається зі стінок. Окрім цього, коли вводять малу кількість рідини, полімер до неї додають періодично, невеликими порціями і послідовно перемішують до однорідної маси.

У промисловості часто використовують „фізичні” модифікації полімерів з метою надання їм необхідного комплексу фізико-механічних властивостей, що значно розширює сфери використання виробів. Прикладом такої модифікації є змішування полімерів, зокрема, полістиролу з каучуками, що підвищує стійкість полімерів до динамічних навантажень. Змішування полімерів проводять у в'язкотекучому стані, воно супроводжується молекулярною дифузією інгредієнтів. Такий процес можливий при дії високих напружень зсуву, які забезпечуються на вальцях чи в екструдерах. Змішування у в'язкотекучому стані можна також здійснити в змішувачах роторно-кулачкового типу.

2.6.2. Змішування (пластикація) полімерів на вальцях

Валки розміщуються паралельно і обертаються в протилежні сторони з різною швидкістю. Відношення окружних швидкостей називається фрикцією (ϕ). Внаслідок налипання розплаву на гарячий валок відбувається втягування його в міжвалковий простір (зазор), який за напрямком руху полімеру звужується (рис. 2.7). Через це рух полімеру відбувається з деяким підпором. Через широкий зазор маси втягується більше, ніж через вузький (по осьовій лінії). Внаслідок цього створюється надлишковий тиск, і маса в центрі потоку починає текти в зворотному напрямку. Отже, у результаті дії надлишкового тиску (тобто градієнта $+dP/dx$) виникає напруження зсуву (зображене епюрою розподілу швидкостей), яке через різноспрямованість викликає, крім поступального руху маси, обертовий рух на вході в зазор (циркуляційні завихрення). Для інтенсифікації змішування в зону протитечії вводять клин.

У точці 0 градієнт тиску змінює знак, тому швидкості поступального і зсувного руху додаються (на епюрі – випукла однонаправлена трапеція). Зсувна течія також зростає за рахунок збільшення фрикції: отже, чим більша фрикція, чим менший зазор між валками, тим більший зсув (швидкість зсуву).

Циркуляційні завихрення, течія зсуву в зазорі між валками обумовлюють перемішування розтопу полімеру тільки в площині xu . Для перемішування маси в усьому об'ємі періодично розтоп підрізують (вручну чи автоматично) і переміщують його по довжині валка з країв до середини.

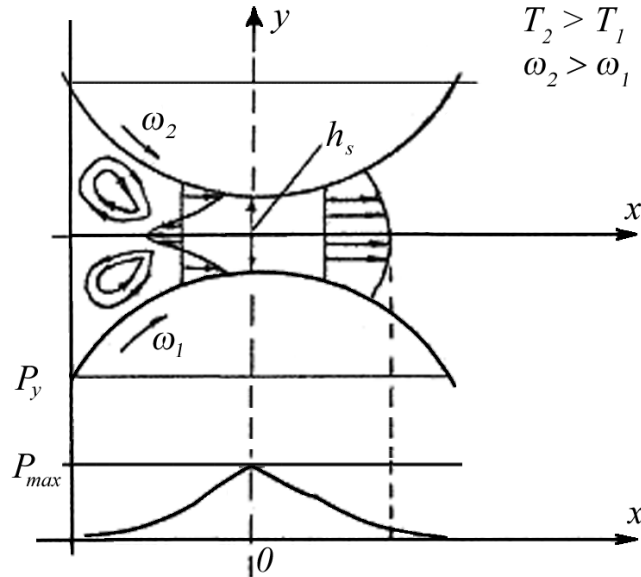


Рис. 2.7. Схема змішування на вальцях

Недоліком цього методу перемішування є велика трудомісткість процесу і ймовірність значної термоокисної деструкції внаслідок тривалого часу контакту полімеру з гарячим валком. Спостерігається також і механодеструкція внаслідок великих напружень зсуву, зумовлених $\Delta P/\Delta x$ і φ . Ефект механодеструкції використовують при пластифікації каучуку для підвищення його технологічності при переробці.

Однорідність (ефективність) змішування оцінюють за рівномірністю розподілу диспергента (наповнювача) в об'ємі дисперсної фази (полімер).

Для встановлення однорідності використовують коефіцієнт неоднорідності:

$$K_n = \frac{100}{C_0} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - C_0)^2}{n-1}}, \quad (2.9)$$

де: C_0 – концентрація диспергента в дисперсійній фазі при ідеальному змішуванні;
 C_i – концентрація в i -тій пробі фази, яку змішують; n – кількість відібраних проб.

Чим ближче K_n до нуля, тим вища однорідність маси (вища ефективність змішування).

Для визначення часу змішування проводять експериментальний аналіз маси шляхом відбору проб через рівні проміжки часу (0,5 ÷ 5 хв) і визначають концентрацію диспергента в дисперсному середовищі:

$$C_i = \frac{m_q}{m_q + m_c} \cdot 100\%, \quad (2.10)$$

де: m_q – маса диспергента; $(m_q + m_c)$ – маса всієї композиції.

Будують графік залежності C від τ (рис. 2.8) і знаходять оптимальний час змішування. Продовження змішування після τ_{opt} неефективне і тільки викликає зайві витрати.

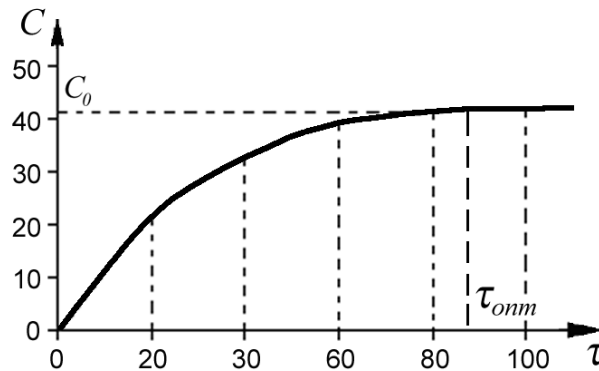


Рис. 2.8. Залежність концентрації диспергента в дисперсійному середовищі від часу змішування

2.7. Розчинення

Для виготовлення плівок, клеїв, лаків, покриттів, а також, деколи, армованих пластиків використовують розчини полімерів чи олігомерів.

Розчинення можна вважати окремим випадком змішування, коли останнє проходить на молекулярному рівні.

При розчиненні вирішують два основних завдання:

- підбір розчинника, виходячи із його хімічної будови, фазових властивостей і термодинамічних умов проведення процесу;
- прогнозування властивостей розчину і відповідного виробу одержаного з нього.

Підбір розчинника проводять за спорідненістю хімічної будови, адекватністю полярності щодо полімеру, що можна вирішити з урахуванням термодинамічних закономірностей розчинення полімерів. Для цього використовують ізобарно-ізотермічний потенціал (ΔG) розчинення:

$$\Delta G = R \cdot T \cdot \ln \left(\frac{P_o^m}{P_o^o} \right), \quad (2.11)$$

де: P_o^o, P_o^m – відповідно парціальні тиски чистого розчинника і розчину. Термодинамічною умовою розчинення твердої речовини в розчиннику є від'ємне значення ΔG ($\Delta G \leq 0$).

Із залежності (2.11) можна зробити висновок, що

$$\Delta G \leq 0, \text{ коли } \left(\frac{P_o^m}{P_o^o} \right) \leq 1, \text{ а } \Delta G = 0 \text{ при } \left(\frac{P_o^m}{P_o^o} \right) = 0.$$

У випадку, коли $\Delta G \leq 0$ ($\left(\frac{P_o^m}{P_o^o} \right) \leq 1$) спостерігається самовільне розчинення полімеру без впливу зовнішньої енергії.

При $\Delta G = 0$ ($\left(\frac{P_o^m}{P_o^o} \right) = 1$) – умова необмеженого набухання – полімер можна примусово перевести в розчин при підвищенні температури або інтенсивному механічному диспергуванні.

Слід пам'ятати, що внаслідок високої молекулярної маси полімеру розчинення останнього відбувається досить повільно, через стадію набрякання. Тому для прискорення процесу його ведуть при нагріванні з перемішуванням продовж тривалого часу.

У випадку $\Delta G \geq 0$ ($\left(\frac{P_o^m}{P_o^o} \right) \geq 1$) розчин не утворюється взагалі.

Якість виробу, отриманого з розчину, залежить від багатьох факторів, основними з котрих є:

1. фізична взаємодія між розчинником і полімером, яка більшою чи меншою мірою впливає на конформацію макромолекул, а отже й на надмолекулярну структуру полімеру у виробі;
2. питома теплота випаровування розчинника, тобто швидкість випаровування (ν_e), яка впливає на фізико-механічні властивості плівки (висока швидкість випаровування ускладнює технологічний процес, зокрема сушіння, оскільки утворюється захисна поверхнева кірка).

2.8. Фарбування

Фарбування проводять з метою надання виробу з полімерного матеріалу естетичного вигляду. Фарбування може бути поверхневим або ж об'ємним. Поверхнєве фарбування направлене на надання відповідного кольору зовнішній поверхні виробу. Таке фарбування здійснюють за допомогою фарб чи лаків, які наносять на поверхню. Сам процес нанесення залежить від конструкції деталі, серійності виробництва та типу пристроїв чи устаткування для нанесення. В зв'язку із цим його здійснюють зануренням виробу у ванну з фарбою чи нанесенням фарби за допомогою фарбувальних пристроїв – фарбувальний інструмент чи аеророзпилювач.

Фарбування в об'ємі здійснюють шляхом змішування полімерної композиції з барвником чи пігментом (обпудрювання гранул, змішування порошків) або ж перемішування гранульованого матеріалу з концентратом. Після змішування порошків, як правило, проводять гранулювання.

Концентрат – це гранули полімеру з вмістом барвника або пігментів 30 ÷ 40 %. Використання концентрату дозволяє виконувати фарбування в процесі переробки, аналогічно обпудрюванню гранул, коли перемішування барвника з розтопом полімеру відбувається в пластикаційній зоні машини.

Стадії таблетування і попереднього підігріву розглянемо в розділі “Виготовлення виробів методом пресування”.

3. ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ ПЕРЕРОБКИ ПЛАСТМАС

Будь-який процес переробки полімерів у виробі пов'язаний з наданням форми й забезпеченням необхідної якості цих виробів. За невеликими винятками для надання форми полімер переводять у в'язкотекучий або високоеластичний стан. Отже, необхідною умовою переробки є наявність температурних інтервалів вищезгаданих станів. Пригадаймо, що полімер може характеризуватись такими температурами фізичних переходів:



де: $T_{кр}$ – температура крихкості; T_c – температура склування; T_m – температура текучості (топлення); T_d – температура деструкції; $T_{кр} - T_c$ – склоподібний стан; $T_c - T_m$ – високоеластичний стан; $T_m - T_d$ – в'язкотекучий стан.

Фізичні перетворення в полімері відбуваються в інтервалі $T_c - T_d$, а хімічні – після T_d для термопластів, у той час, як для реактопластів інтервал хімічних перетворень знаходиться між T_m та T_d .

Переважає кількість методів базується на переробці полімеру у в'язкотекучому стані, отже, інтервал переробки в цьому випадку буде $(T_m - T_d)$. Величина інтервалу (ΔT), як нам відомо, залежить від будови полімеру і може мати різні значення, наприклад, $^{\circ}\text{C}$:

- поліетилен: $T_m = 110$; $T_d = 300$; $\Delta T = 190$;
- поліпропілен: $T_m = 170$; $T_d = 300$; $\Delta T = 130$;
- полівінілхлорид: $T_m = 165$; $T_d = 170$; $\Delta T = 5$;
- поліамід-66: $T_m = 220$; $T_d = 260$; $\Delta T = 40$.

Величина температурного інтервалу обумовлює простоту технологічного процесу переробки полімерів з розтопу. Чим більший інтервал, тим більше можливостей зміни технологічних режимів переробки, а, отже – більше можливостей інтенсифікувати процес, зменшити трудозатрати, вплинути на якість виробу, розширити методи переробки та варіанти конструкції формувального інструменту (оснащення).

Полімери з вузьким температурним інтервалом переробки в чистому вигляді практично не переробляються через складність дотримання необхідного режиму. Тому до них додають стабілізатори, які дещо підвищують T_d , а також пластифікатори, які знижують T_m ; таким чином, розширюється інтервал переробки.

Вид і кількість стабілізаторів і пластифікаторів визначаються природою полімеру, його надмолекулярною структурою і механізмом деструкції.

Наявність температурного інтервалу $(T_m - T_d)$ – необхідний, але недостатній фактор для успішного формування виробу з розтопу. Крім цього, важливе значення має в'язкість (η) розтопу та її залежність від температури T і тиску P .

В той час, як $T_m - T_d$ можна для одного і того ж полімеру розширити введенням пластифікатора і стабілізатора, то взаємозв'язок η з P і T визначається будовою полімеру, його молекулярною масою і носить нелінійний характер. Цілком зрозуміло, що чим нижча η розтопу, тим він легше буде перетікати через канали і розпливатися в порожнині форми, тобто будуть потрібні менші зусилля для перетискання розтопу. Він буде характеризуватись вищою текучістю.

Із основних законів фізики ми знаємо, що для “ньютонівських” рідин з підвищенням T , η пропорційно зменшується і не залежить від швидкості перетікання рідини. Але розтоп полімеру не є “ньютонівською” рідиною. Це є, в основному, псевдопластична рідина, для якої характерне зменшення η зі збільшенням швидкості зсуву, яка виникає при течії. Причому характер зміни η від швидкості зсуву залежить від температури. Таке явище

називається аномалією в'язкості і, на відміну від “ньютонівських” рідин, рівняння течії розтопу записується в загальному вигляді:

$$\tau = \eta \cdot \bar{\gamma}^n, \quad (3.1)$$

де: τ – напруження зсуву (зміщення одного шару рідини відносно другого); η – коефіцієнт в'язкості; $\bar{\gamma}$ – швидкість зсуву (градієнт швидкості течії по висоті потоку); n – індекс текучості (перебуває в межах $0,1 \div 1,0$).

Графіки залежностей τ від $\bar{\gamma}$ та η від T і $\bar{\gamma}$ наведені на рис. 3.1.

Із рис. 3.1 (б, в) видно, що зі зростанням температури аномалія суттєво зменшується при значному пониженні її величини (η наближається до одиниці). Цей ефект, зрозуміло, обумовлює вищу швидкість течії, що, у свою чергу, впливає на продуктивність процесу і якість виробу. Причому із зростанням температури зменшується напруження зсуву, тобто потрібний менший тиск для забезпечення течії і тому знижується концентрація внутрішніх напружень та зменшується вплив ефектів, викликаних напруженням зсуву – ефект Баруса, матовість, мікротріщини, саморозігрівання тощо.

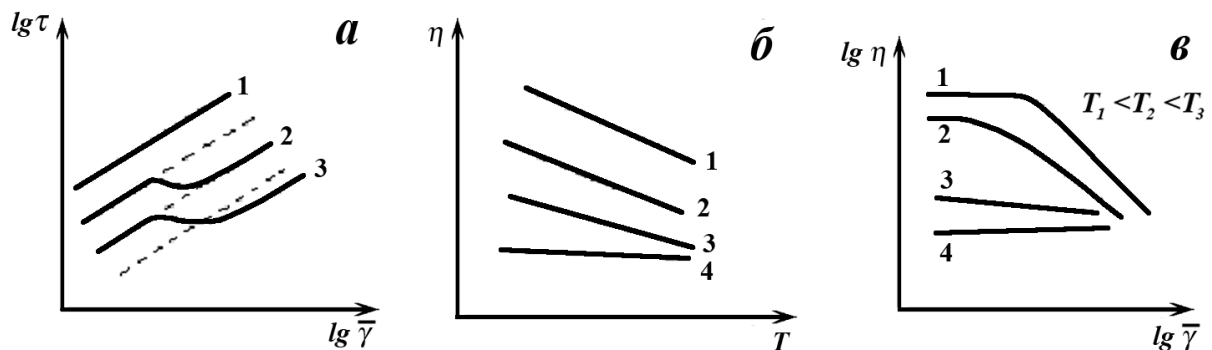


Рис. 3.1. Графіки залежностей τ від $\bar{\gamma}$ (а) і η від T і $\bar{\gamma}$ (б і в).

1, 4 – ньютонівська рідина; 2, 3 – псевдопластична рідина; 2 – розтоп; 3 – розчин полімеру

Залежність η від T свідчить про енергетичну активацію руху – енергію активації в'язкої течії, яка, до речі, як видно з рис. 3.1, б залежить від швидкості течії.

Енергія активації в'язкої течії і в'язкість розтопу пов'язані такими залежностями:

$$\eta = A \cdot e^{\frac{E}{R \cdot T}} \quad \text{або} \quad \ln \eta = \ln A + \frac{E}{R \cdot T}, \quad (3.2)$$

де: E – енергія активації в'язкої течії.

Вплив температури на в'язкість розтопу полімеру визначають із залежності:

$$\eta = K_o \cdot e^{-\epsilon(T-T_0)}, \quad (3.3)$$

де: T – абсолютна температура (біжуча); T_0 – температура стандартного випробування; K_o – коефіцієнт реологічної залежності τ від $\bar{\gamma}$; ϵ – коефіцієнт, який залежить від природи полімеру (тобто від E).

Розв'язуючи рівняння (3.2) для двох температур при умові $\bar{\gamma} = \text{const}$, отримуємо:

$$E = \frac{R \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot \ln(\eta_1 / \eta_2)}{T_2 - T_1}, \quad (3.4)$$

Звідси ми можемо розрахувати, до якої T_2 необхідно нагріти розтоп, щоб досягти в'язкості η_2 , необхідної для забезпечення відповідної швидкості течії при переробці. Із рівнянь видно, що залежність η від T визначається величиною E , яка у свою чергу залежить від природи полімеру (табл. 3.1).

Цілком зрозуміло, що чим вище значення E , тим більш відчутний вплив T на η (див. рис. 3.1, б), що позначається на різкій зміні η в більш вузькому температурному інтервалі.

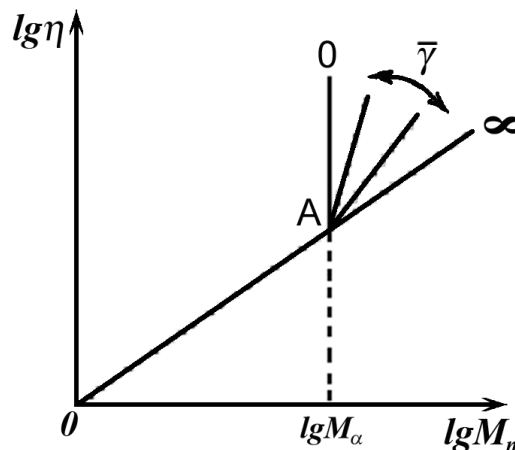
Величина енергії активації в'язкої течії для деяких полімерів

Полімер	Інтервал температур, К	Е, кДж/моль
ПЕВГ	431 ÷ 547	25,1 ÷ 31,4
ПЕНГ	398 ÷ 513	54,5 ÷ 57,4
ПК	533 ÷ 589	108,9 ÷ 150,8
ПП	463 ÷ 563	79,6 ÷ 96,4
ПС	393 ÷ 523	96,4 ÷ 176
ПВХ	453 ÷ 483	103,5 ÷ 119
ПТФЕ	613 ÷ 638	104,9

Слід зауважити, що η , тобто текучість розтопу, залежить від молекулярної маси полімеру:

$$\eta = C \cdot \bar{M}^\alpha, \quad (3.5)$$

де: $C = \text{const}$; $1 \leq \alpha \leq 3,5$. При $\bar{\gamma} \rightarrow 0$ $\alpha \cong 3,5$, а при $\bar{\gamma} \rightarrow \infty$ $\alpha \cong 1$. Залежність в'язкості від молекулярної маси полімеру наведена на рис. 3.2.

Рис. 3.2. Залежність $\lg \eta$ від $\lg M_n$

До т.А – низькомолекулярні сполуки, від т.А – високомолекулярні сполуки (ВМС). Видно, що для ВМС спостерігається зміна характеру залежності $\eta = f(M)$ яка обумовлена швидкістю зсуву.

Вплив тиску. Під час переробки заповнення форми відбувається при високому тиску (під його дією). При зростанні тиску закономірно збільшується густина (ρ) розтопу: відбувається зближення макромолекул і зростає міжмолекулярна взаємодія, отже і в'язкість. Ці зміни відбуваються до критичного значення $P_{кр}$, при якому в'язкість досягає значення в'язкості твердого тіла. Таке явище називається явищем псевдокристалізації. Тиск, при якому настає псевдокристалізація ($P_{кр}$) залежить від T . Наприклад, для ПЕ $P_{кр} = 60$ МПа при $T = 150^\circ\text{C}$, а при $T = 165^\circ\text{C}$ – $P_{кр} = 120$ МПа.

При переробці розтоп полімеру зазнає дії напружень зсуву, що викликає орієнтацію макромолекул, може полегшити псевдокристалізацію й понизити $P_{кр}$.

Вплив P на η різний і залежить від будови полімеру. Він більш чутливий для розгалужених полімерів, а також для полімерів з великими боковими замісниками: наприклад, для ПС при 195°C η зростає в 135 разів при зміні P від 36 до 175 МПа, а для ПЕ при цьому градієнті тиску у 4 ÷ 5 разів при 150°C .

Залежність η від P при сталій $\bar{\gamma}$ описується рівнянням:

$$\eta_p = \eta_0 \cdot e^{\beta \cdot P}, \quad (3.6)$$

де: η_0 – в'язкість при атмосферному тиску; β – постійна, яка залежить від природи полімеру і швидкості зсуву ($\bar{\gamma}$), наприклад, для ПЕ $\beta = 1,2 \cdot 10^{-8} \div 1,4 \cdot 10^{-8} \text{ Па}^{-1}$, а для ПС $\beta = 3,2 \cdot 10^{-8} \text{ Па}^{-1}$.

Явище псевдокристалізації призводить до розриву струмینی при течії розтопу, проскакуванню окремих порцій у вигляді корків і заповнення об'єму форми пористим матеріалом.

3.1. Температурно-часовий інтервал переробки полімерів

Якість виробу в значній мірі залежить від в'язкості розтопу полімеру при переробці й від вмісту в ньому води (рис.3.3).

Тому з метою дотримання стабільності процесу переробки і досягнення стабільних, однакових якісних показників виробів потрібно виключити коливання в'язкості розтопу, а отже і коливання параметрів процесу формування внаслідок термоокисної і гідролітичної деструкції полімеру при переробці.

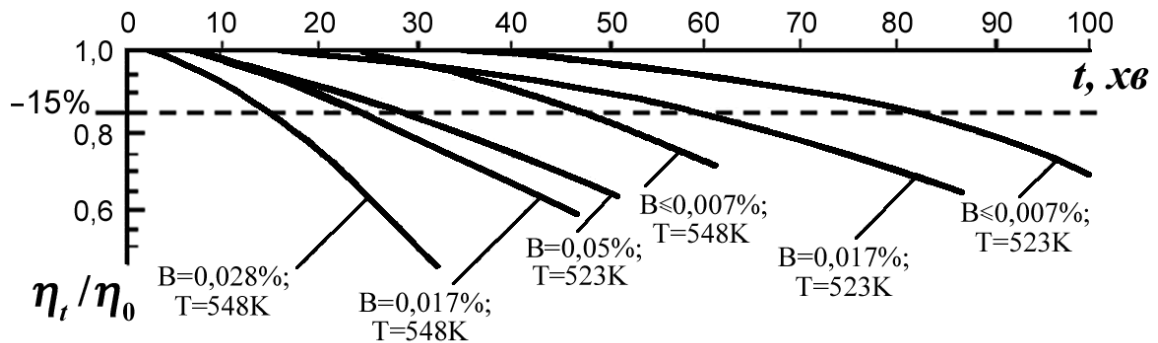


Рис. 3.3. Приклади змін в'язкості ПК марок ПК-1, ПК-2, ПК-3 в залежності від тривалості його нагріву (t) при різних значеннях температури (T) і вологості (B) у вихідному матеріалі

Температурно-часовий інтервал переробки полімеру, в якому усуваються або мінімізуються деструктивні процеси, визначають із залежності термостабільності розтопу полімеру від температури (рис. 3.4).

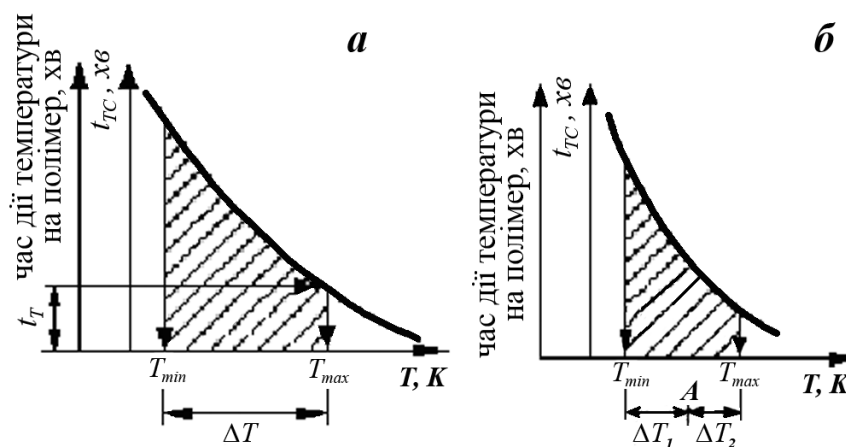


Рис. 3.4. Температурно-часова область переробки полімерів

Температурно-часовий період, у якому можлива переробка полімеру, виділений штрихованою ділянкою на рисунку. Інтервал обмежений зі сторони низьких температур мінімальною температурою переробки T_{min} . Вона залежить від температури текучості

полімеру і реологічних характеристик розтопу, а також від умов переробки, які різні для кожного методу переробки (табл. 3.2.).

Таблиця 3.2

Оцінка перероблюваності термопластів за можливим температурно-часовим інтервалом переробки на прикладі лиття під тиском

Термопласт	Марки *	T_{\min} , К	T_{\max} **, К	T_{\max} ** ÷ T_{\min}	Оцінка перероблюваності
ПСОН	ПСМД, ПСМ ПСС, ПССП,	433	553	120	Добре
	ПСЕ-1, ПСЕ-2	433	543	110	Добре
ПК	ПК-1, ПК-2, ПК-3	523	563	40	Задовільно
	ПК-6	523	593	70	Добре
ПММА	ЛПТ, ЛСОМ, ЛСОМ-4Б, Дакрил 2М	458	503	45	Задовільно
ПСФ	Литтєва А	553	613	60	Добре
ПЕВГ	Марки за ГОСТ 16338-77 (див. табл.3.8)	453	553	100	Добре
ПЕНГ	Марки за ГОСТ 16337-77 (див. табл.3.8)	433	553	130	Добре
ПП	04П, 05П	463	543	80	Добре
ПА-12	П-12-10	493	558	65	Добре
ПА-610	ПА-610	503	543	40	Задовільно
ПА-6	ПА 6-210/310	508	543	35	Задовільно
ПА-66	Литтєва	538	558	20	Низька
СФД	СФД-А, СФД-Б, СФД-В, СФД-Д	448	493	45	Задовільно
СТД	СТД-А, СТД-Б, СТД-В, СТД-Г, СТД-Д	448	493	45	Задовільно
ПЕТФ	030 110	533	543	10	Низька
ПБТФ		508	543	35	Задовільно
* Нормативно-технічна документація на марки термопластів приведена в табл. 3.8.					
** Температура T_{\max} дана з урахуванням можливого відхилення температурного режиму переробного обладнання					

Зі сторони високих температур цей інтервал обмежений максимальною температурою переробки T_{\max} . Для визначення цієї температури на осі ординат відкладають час дії температури переробки t_T на полімер в обладнанні, у якому здійснюється переробка. З цього пункту проводять лінію, паралельну до осі абсцис до перетину із залежністю: період термостабільності – температура (рис. 3.4, а). Абсциса одержаної точки перетину відповідає максимальній температурі переробки для даного випадку. Враховуючи можливі відхилення температурного режиму внаслідок інерційності системи нагрівання, а також враховуючи саморозігрівання матеріалу при течії з високими швидкостями зсуву (дисипація енергії), реальну температуру T'_{\max} беруть нижчою на $10 \div 15^\circ\text{C}$ від розрахункової. Час дії температури розраховують, виходячи із часу циклу:

$$t_T = \frac{m}{m_0} \cdot t_u, \quad (3.7)$$

де: t_u – час циклу переробки; m – маса матеріалу в нагрівному циліндрі; m_0 – маса однієї відливки.

Для екструзійних процесів час дії температури розраховують з використанням продуктивності екструдера:

$$t_T = v_{\text{цл}} / Q, \quad (3.8)$$

де: $v_{\text{цл}}$ – об'єм каналу шнека між витками; Q – продуктивність екструдера.

Режим переробки полімеру визначений на рис. 3.4, б (точка А) повинен знаходитись в температурно-часовій області, причому робочі інтервали температур ΔT_1 і ΔT_2 повинні складати не менше $10 \div 15$ К.

Температурний інтервал ΔT характеризує перероблюваність полімеру: полімер добре перероблюється (хороша перероблюваність), коли ΔT більший 50 К; задовільно, коли $\Delta T = 30 \div 50$ К; і важко перероблюється, у випадку, коли ΔT менший за 30 К.

Для підтримання стабільності переробки термонестабільних полімерів необхідно використовувати марочний асортимент полімерів з відповідною в'язкістю розтопу, що дозволяє строго регламентувати температурні умови переробки.

3.2. Текучість і її використання під час розробки технології переробки полімерів

Як вже зазначалося вище, текучість є визначальною характеристикою полімеру при його переробці.

Текучість – здатність розтопу полімеру до в'язкої течії (плинності), яка відбувається під дією зовнішнього зусилля (при цьому виникає напруження зсуву). Текучість адекватна оберненому значенню в'язкості розтопу (обернено пропорційно залежить від η): $T_e \approx 1/\eta$.

Для оцінки текучості можна використати криві течії (див. рис. 3.1) при різних значеннях швидкості зсуву і температури.

Експрес-методи визначення текучості базуються на визначенні “показника текучості розтопу” (ПТР) для термопластів (рис. 3.5) і текучості за Рашигом для реактопластів (рис. 3.6). Для термопластів існує ще один метод оцінки текучості, який полягає у визначенні шляху проходження розтопу під тиском по спіралеподібному каналу у формі із заданою температурою.

Показник текучості розтопу використовується:

1. для попередньої оцінки придатності полімеру до переробки у в'язкотекучому стані;
2. розрахунку і конструювання обладнання і технологічного оснащення;
3. при виборі методу та режиму переробки досліджуваного полімеру.

Технологічні властивості термопластів характеризують їх здатність бути переробленими у виробі. Вибір методу переробки і оптимізацію технологічних параметрів проводять з урахуванням таких технологічних характеристик, як показник текучості розтопу, гранулометричний склад, вологість та вміст летких, насипна густина. Знання цих характеристик дає можливість правильно вибрати температуру і тиск при переробці, розрахувати розміри форм, завантажувальних камер, матеріального циліндра тощо.

Текучість це здатність полімерних розтопів матеріалів до в'язкої течії під дією тепла і тиску. Практично для оцінки міри текучості термопластів користуються показником текучості розтопу. ПТР – маса або об'єм полімеру, яка витиснена протягом 10 хв через стандартне сопло (частіше діаметром $2,095 \pm 0,005$ мм) під дією певного вантажу і при заданій температурі. Визначення показника текучості розтопу проводять за допомогою екструзійного пластометра за ГОСТ 11645-73. Умови проведення дослідження подані нижче (табл. 3.3).

Для обчислення технологічних параметрів текучість подають у вигляді реологічної залежності:

Умови визначення показника текучості розтопу деяких термопластів

Полімер	Температура, °С	Вага вантажу, Н	Діаметр капіляра, мм
Поліетилен ВТ	190 ± 0,5	21,2	∅ 2,095 ± 0,005
Поліетилен НТ	190 ± 0,5	49,0	∅ 2,095 ± 0,005
Поліпропілен	230 ± 0,5	21,2 або 49,0	∅ 2,095 ± 0,005
Полістирол	200 ± 0,5	49,0	∅ 2,095 ± 0,005

$$\bar{\gamma} = \frac{3 \cdot n + 1}{n} \cdot \frac{ПТР}{600 \cdot \rho \cdot \pi \cdot r^3}, \quad (3.9)$$

де: n – індекс текучості; ρ – густина розтопу полімеру при температурі досліджу; r – радіус каналу, через який перетискається полімер.

3.2.1. Суть методів визначення текучості

ПТР для термопластів визначають на вантажному капілярному віскозиметрі типу "ИИРТ". Метод полягає у визначенні кількості розтопу полімеру, який витікає через капіляр відповідного діаметра за одиницю часу (на практиці за 10 хв):

$$ПТР = \frac{10 \cdot m}{\tau}, \quad (3.10)$$

де: m – маса полімеру, що витікає через стандартний капіляр за час τ при стандартизованих температурі і постійному навантаженні.

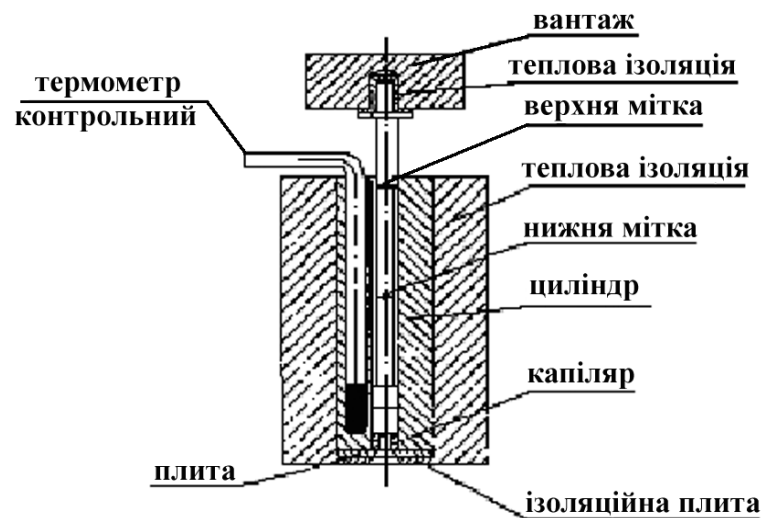


Рис. 3.5. Схема приладу для визначення ПТР (вимірювання індексу текучості розтопу – „ИИРТ“)

Показник текучості розтопу може бути як масовим так і об'ємним – залежно від того, що вимірюється при течії (маса чи об'єм). На основі значення ПТР можна вибрати метод переробки. Так, для лиття під тиском умовно рекомендовані полімери з ПТР ≥ 1,2 ÷ 7 г/10 хв; для екструзії – 0,3 ÷ 1,2 г/10 хв; для нанесення покриття – 20 г/10 хв. Однак відомо, що в'язкість можна змінювати, змінюючи температуру, тому для полімерів із широким значенням ($T_m - T_d$) цей поділ умовний.

Так, поліетиленові труби одержують з полімерів, які мають ПТР = 0,3 ÷ 1 г/10 хв, а поліетиленову плівку – з полімерів з ПТР = 1 ÷ 3 г/10 хв; для лиття під тиском використовують ПЕ з ПТР = 3 ÷ 7 г/10 хв.

Ми вже знаємо, що η є функцією молекулярної маси і будови полімеру, а тому ПТР має свою емпіричну залежність від цих факторів:

$$ПТР = \exp(C - \bar{M}_n / B), \quad (3.11)$$

де: \bar{M}_n – середньочислова молекулярна маса; C і B – сталі, які відповідно залежать від будови полімеру і швидкості течії.

Тому здатність до переробки відповідним методом встановлюють залежно від \bar{M}_n кожного конкретного полімеру.

3.2.2. Визначення текучості за Рашигом

Метод визначення текучості реактопластів за Рашигом полягає у визначенні максимально можливого шляху перетікання розтопу під дією зусилля (P) у конусоподібному капілярі (який нагрітий до стандартизованої температури) до моменту втрати текучості, тобто до затвердження (рис. 3.6).

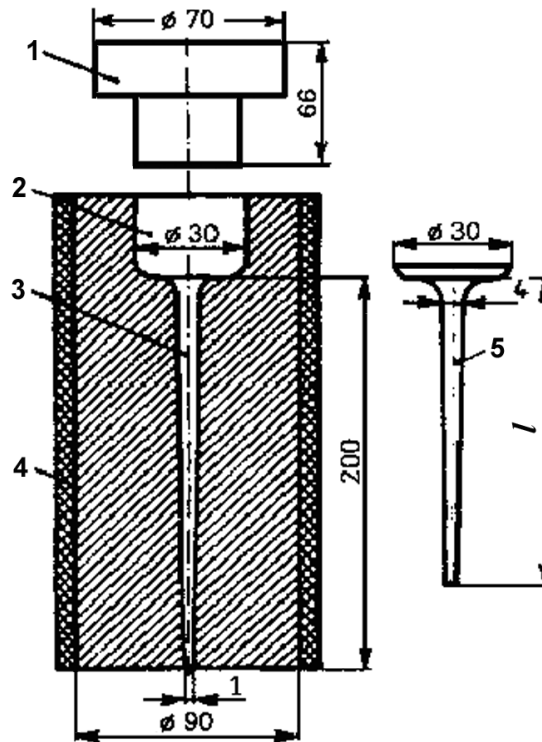


Рис. 3.6. Схема форми Рашига – Крахля:

1 – пуансон; 2 – засипна камера; 3 – формувальне гніздо (канал конусний);

4 – нагрівник; 5 – відпресований зразок

Текучість визначається за довжиною (l) відпресованого стержня (стріли). При визначенні текучості реактопластів за Рашигом, на відміну від ПТР, відбувається затвердження розтопу при течії. Отже, матеріал тече до моменту затвердження. Тому визначена величина відносна, оскільки відчутно залежить від реакційної здатності реактопласту.

У випадку, коли в'язкість розтопу мала, а реакційна здатність висока, текучість, визначена за таким методом, є низькою. Однак визначену текучість використовують для розробки технологічного режиму переробки реактопластів і прогнозування методу їх переробки: для компресійного пресування текучість повинна дорівнювати $30 \div 150$ мм, а для литтєвого пресування – $90 \div 180$ мм.

3.2.3. Вплив текучості на якість виробів і конструктивні особливості обладнання

Висока текучість характерна для більшості кристалічних полімерів. Високотекучі полімери під тиском проникають в найменші щілини, що обумовлює наявність значної переливки і вимагає додаткових операцій для її видалення, а також ставить високі вимоги до щільності оснащення.

Для низьков'язких розтопів характерна велика усадка (збіжність), через це потрібні додаткові розрахунки виконавчих розмірів оснащення.

При великій текучості внаслідок зростання зворотних потоків у каналі шнека зменшується пластикаційна (гомогенізуюча з дозуванням) продуктивність обладнання.

Для лиття низьков'язких матеріалів потрібно використовувати ливники спеціальної конструкції із запірними соплами.

Вироби на основі низьков'язких матеріалів, як правило, мають нижчі механічні властивості, але високий полиск поверхні.

При низькій текучості (високій в'язкості) ускладнюється процес заповнення форми і тому необхідне підвищення тиску і температури, що призводить до зростання енерговитрат процесу переробки. Підвищення температури супроводжується подовженням технологічного циклу (оскільки потрібно більше часу на охолодження), а також – зростанням усадки. Вплив текучості на фізико-механічні властивості полімерів, зокрема поліетилену високої густини показано на рис. 3.7.

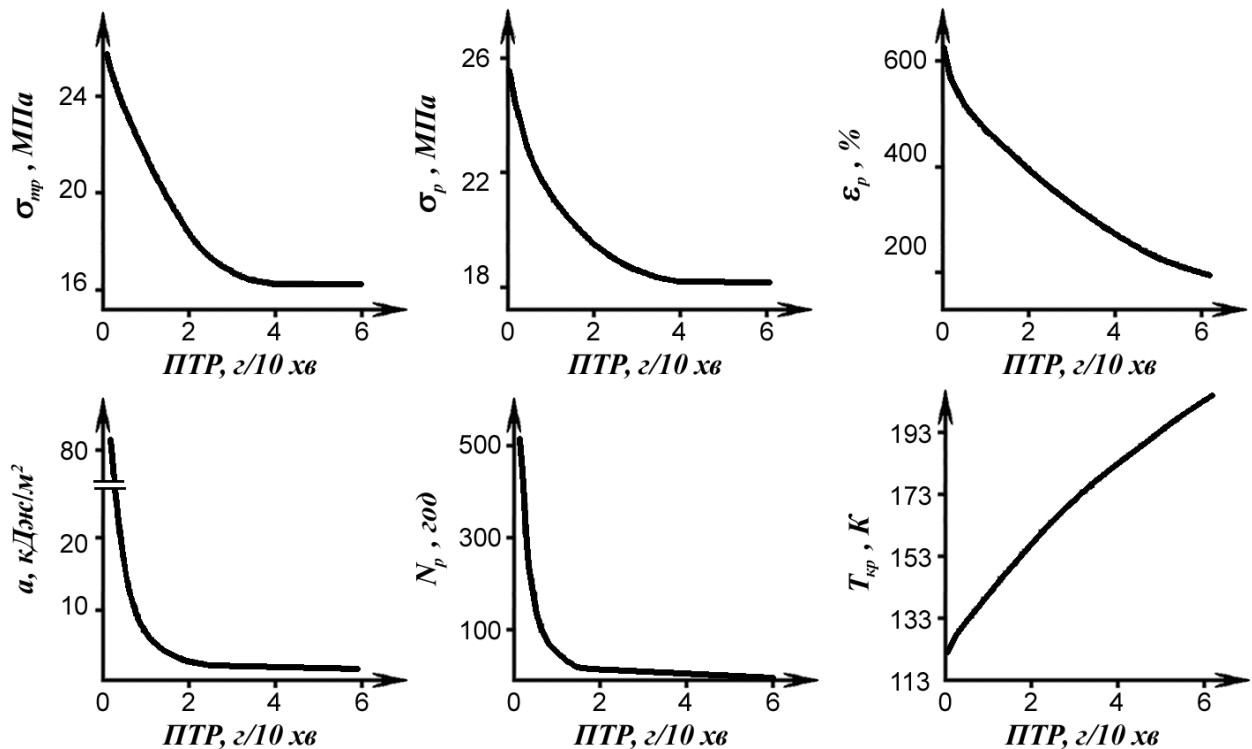


Рис. 3.7. Залежність границі текучості при розтягу $\sigma_{тр}$, руйнуючого напруження при розтягу σ_p , відносного видовження при розриві ϵ_p , ударної в'язкості a , стійкості до розтріскування N_p та температури крихкості $T_{хр}$ від ПТР для ПЕВГ

Підвищення тиску спричинює орієнтацію ланцюгів у напрямку течії (орієнтаційні напруження), що призводить до зростання анізотропії механічних властивостей, зменшення стійкості до розтріскування і пониження температури короблення. Анізотропія – розбіжність характеристик матеріалу в різних напрямках (в даному випадку в паралельному і перпендикулярному напрямку до напрямку потоку).

3.3. Вибір методу переробки полімерів

Для виготовлення конкретного виробу, як вже зазначалось вище, може бути використано кілька методів переробки пластмас.

При виборі методу виготовлення виробу першочергове значення набувають його вид, форма і розміри, тираж, економічні фактори.

При визначенні економічної доцільності вибору того чи іншого методу переробки на перший план висуваються питання продуктивності і розмірної стабільності. Слід пам'ятати, що вартість оснащення зараз досить висока, інколи вона досягає вартості основного обладнання.

Тому при малосерійному виробництві треба використовувати такі методи виготовлення виробів, у яких вартість оснащення мінімальна (форма з деревини, гіпсу, легких листових металів), а при багатосерійному виробництві слід враховувати інші фактори: вартість і доступність сировини, її технологічні характеристики, кількість відходів тощо. Якщо ж основну роль відіграє точність розмірів, то саме вона визначає метод переробки, економічність процесу і вартість готових виробів. Для досягнення стабільності розмірів виробів виправдане проектування більш дорогого оснащення з якісних сталей.

Таким чином, вибір оптимального методу формування виробів з полімерів повинен здійснюватися на основі аналізу сукупності всіх факторів з урахуванням їх важливості.

3.4. Технологічні властивості термопластів

Показник текучості розтопу необхідний для попереднього вибору методу переробки термопластів, а також – для конструювання оснащення та вибору параметрів переробки.

Гранулометричний склад визначають ситовим аналізом, який характеризує вміст частинок різного розміру в порошкоподібних і гранульованих матеріалах. Розмір частинок вимірюється в міліметрах чи мікронах, а ступінь дисперсності визначається в процентах і вказує на наявність частинок певного розміру в даній кількості матеріалу.

Гранули полімеру можуть мати різноманітну форму: циліндра, пластинки, куба, кулі тощо. В одній партії матеріалу форма гранул повинна бути однаковою, а їхні розміри максимально наближеними, тобто матеріал повинен бути однорідним. Оптимальний розмір гранул залежить від виду матеріалу і методу його переробки: з підвищенням температури топлення полімеру розмір гранул рекомендується зменшити. Для термопластів, що переробляються у виробі методом лиття під тиском і екструзією, розмір гранул повинен перебувати в межах $2 \div 5$ мм, а для екструзії тонкостінних труб і профілів – $1,5 \div 3$ мм.

Вміст вологи і летких речовин визначають перед переробкою полімерних матеріалів, щоб правильно вибрати технологічні параметри виготовлення виробів і визначити необхідність сушіння матеріалу.

Вміст вологи і летких регламентується ДСТ на даний полімер. Високий вміст вологи може бути причиною браку – у виробках можуть утворюватися пори, пухирі, погіршуватися зовнішній вигляд, з'являтися сріблясті смуги, поздовжні пасма, мікротріщини.

Граничний вміст вологи і летких, наприклад, у прес-порошках фенопластів становить $2 \div 4,5$ %, в амінопластах $3,5 \div 4$ %, в етролах $1,7 \div 3$ %, у волокнистих і шаруватих пластиках $0,8 \div 3$ %, в поліамідах $0,2$ %.

Вміст вологи і летких визначається за різницею в масі певної наважки вихідної пластмаси до і після сушіння в термостаті при певній температурі (найчастіше 105°C) і тривалості витримки (переважно 1 година):

$$W = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \cdot 100\%, \quad (3.12)$$

де: W – вміст води і летких, %; m_0 – маса наважки полімеру до сушіння, г; m_1 – маса наважки полімеру після сушіння, г.

Насипна густина ($\text{кг}/\text{м}^3$) – це відношення маси матеріалу, який переробляється, до його об'єму. Користуючись значенням насипної густини, можна розрахувати завантажувальний простір прес-форм та бункерів обладнання для переробки пластмас.

Питома густина ($\text{кг}/\text{м}^3$) – використовується для конструювання виробів і розрахунку теплових процесів при переробці.

Усадка (збіжність) (%) – основним параметром, який використовується для розрахунку виконавчих розмірів гнізда форми та для конструювання виробу. Первинна усадка враховує збіжність матеріалу у формі при виготовленні виробу у відповідному режимі а вторинна усадка – після видалення виробу з форми й охолодження його до кімнатної температури.

Температури переходів (T_c , $T_{m(n)}$ і T_d) – використовують для встановлення методу переробки конкретного полімерного матеріалу та визначення режимів формування.

4. ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ З ТЕРМОПЛАСТІВ

4.1. Технологія формування методом лиття під тиском

Лиття під тиском – один із найважливіших методів виготовлення поштучних виробів з пластмас. Основні переваги методу – висока продуктивність, можливість виготовлення широкого асортименту виробів складної конфігурації масою від часток грама до декількох десятків кілограмів, висока точність розмірів, відсутність додаткової обробки, економічність, високий рівень автоматизації. Методом лиття під тиском можна переробляти у виробі практично всі термопласти і частину термореактивних матеріалів.

Суть процесу виготовлення виробів з пластмас литтям під тиском полягає в тому, що полімер у матеріальному циліндрі литтєвої машини топиться, гомогенізується, нагрівається до необхідної температури лиття й потім за допомогою шнека або плунжера (залежно від типу машини), упорскується в попередньо зімкнену форму, температура якої значно нижча від температури розтопу. Внаслідок охолодження в матеріалі відбувається фазовий перехід з в'язкотекучого у склоподібний чи кристалічний стан (матеріал застигає), і виріб набуває необхідних розмірів та фізико-механічних властивостей.

Отже, при литті термопластів відбуваються лише фізичні процеси, а саме топлення полімеру, деформування під зовнішнім тиском розтопу і його течія з високою швидкістю, ущільнення і фазовий чи фізичний перехід (застигання). Застигання розтопу – фізичний процес переходу полімеру з в'язкотекучого стану в склоподібний чи кристалічний фізичний (твердий агрегатний) стан. Процес лиття здійснюють на литтєвих машинах плунжерного чи шнекового типу (рис. 4.1).

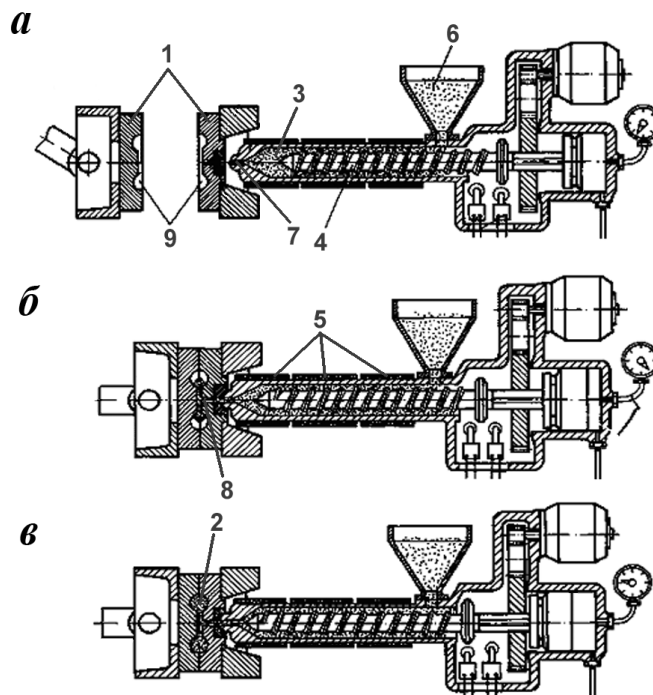


Рис. 4.1. Принципова схема лиття на литтєвій машині зі шнековим пластикатором:
 а) перед упорскуванням (після пластикації); б) при впорскуванні; в) витримка на охолодження після заповнення форми; 1 – півформи; 2 – виріб; 3 – пластикаційний циліндр; 4 – шнек; 5 – нагрівні елементи; 6 – завантажувальний бункер; 7 – сопло литтєве; 8 – ливниковий канал; 9 – формуюче гніздо

Матеріал з бункера (6) надходить при обертанні шнека (4) в пластикаційний (інжекційний) циліндр (3), де він топиться при переміщенні вперед в матеріальному циліндрі вздовж шнека, який обертається, і відтискається розтопом назад. Розтоп гомогенізується і

накопичується у необхідній дозі на виході з шнеку. Після того, внаслідок поступального руху шнека вперед, внаслідок передачі на нього тиску лиття ($40 \div 250$ МПа), розтоп перетікає через литтєве сопло (7) і ливникові канали (8) у порожнину форми (9) – відбувається упорскування розтопу у форму.

Класифікація литтєвих машин, що випускають в Україні, подана в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Технічні характеристики деяких машин для лиття під тиском термопластів

Параметри машин	ДЕ 3121.1	ДЕ 3127-63Ц	ДЕ 3130-125Ц	ДЕ 3132-250Ц	ДЕ 3332ФІ	ДП 3334ФІ	Д 3136-1000	Д - 3138 - 2000	Дп 3140.2
Максимальне зусилля, кН	160	550	1150	1600	1600	2500	4000	6300	10000
Мінімальний час запирання і розмикання форми, с	0.6	1.2	1.7	2.0	2.1	2.4	7.5	8.5	8.3
Діаметр шнека, мм	22	36	40	50	50	60	90	100	125
Максимальний об'єм упорскування, см ³	23	105	178	300	300	300	1250	2500	5000
Максимальний тиск лиття, МПа	140	140	140	140	140	140	140	140	150
Максимальна пластикаційна продуктивність, кг/год	19	60	72	125	135	200	375	600	550
Частота обертання шнека, об/хв	25 ÷ 480	20 ÷ 300	40 ÷ 360	20 ÷ 320	300 ÷ 320	60 ÷ 300	40 ÷ 180	10 ÷ 166	10 ÷ 120

Литтєве сопло, що з'єднує форму з матеріальним циліндром, призначене для підтримання температури розтопу на заданому рівні й для запобігання витіканню розтопу з матеріального циліндра при переробці термопластів, які характеризуються низькою в'язкістю розтопу (наприклад, поліаміди). В останньому випадку використовують спеціальні самозапінні сопла різних конфігурацій.

Виріб формується в литтєвій формі, конструкція і розміри якої залежать від форми, розмірів і кількості виробів, які одночасно одержують. У формі можна виділити дві частини – пуансон і матрицю, які мають канали для охолодження чи підігріву. Для швидкого і рівномірного заповнення порожнини форми в ній є система ливникових каналів: центральний, розвідні, впускні (рис. 4.2).

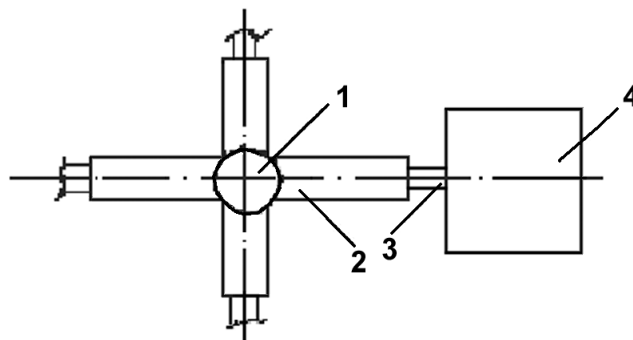


Рис. 4.2. Схема ливникової системи:

1 – центральний ливник; 2 – розвідний ливник; 3 – впускний ливник; 4 – виріб

Матеріал з пластикаційного циліндра потрапляє через сопло в центральний ливник, з якого в розвідні канали і через впускний – у порожнину форми, де формується виріб.

Для видалення з форми відливки після охолодження призначена система виштовхувачів. Матриця і пуансон закріплені відповідно до нерухомої й рухомої плит пресової частини термопласт-автомата. При переміщенні рухомої плити в процесі розмикання форми виштовхувачі штовхають готовий виріб разом з відформованими ливниками з матриці, внаслідок чого відливка видаляється з форми. При змиканні форми система виштовхувачів повертається в початкове положення.

4.1.1. Різновидності процесів лиття під тиском

4.1.1.1. Лиття в холодну форму. Це найпоширеніший спосіб, який застосовують для формування великого асортименту виробів з термопластів у випадку, коли даний процес відбувається без ускладнень. Метод ще називають холодноканалним литтям.

4.1.1.2. Лиття під тиском при змінній температурі форми. ($P_L = 100 \div 200$ МПа). У момент заповнення форми, тобто в момент упорскування, форма нагріта до температури, близької до температури розтопу. Після упорскування форма охолоджується з потрібною швидкістю, внаслідок цього значно подовжується цикл лиття. Тому спосіб використовують в крайніх випадках, коли потрібно сформувати виріб тонкостінний, з великою площею поверхні, з полімеру, який характеризується вузьким інтервалом $T_p \div T_0$ або високою температурою кристалізації (наприклад, з поліетилентерефталату).

4.1.1.3. Спосіб інтрузії (спосіб самовільного заповнення форми розтопом). Суть його полягає в тому, що форма заповнюється розтопом при невисокому тиску (до 40 МПа) і при постійному обертанні шнека, який знаходиться в крайньому лівому положенні (в кінці зони дозування). При цьому опір оснащення повинен бути мінімальним, тому перетин каналів ливникової системи роблять максимально великим, або ж порожнина форми заповнюється відразу з центрального ливникового каналу.

Для створення потрібного тиску, який би забезпечив необхідну швидкість течії, використовують шнек зі зворотним конусом. Отже, при цьому способі суміщаються операції пластикації і заповнення форми.

Спосіб використовують для виготовлення товстостінних великогабаритних виробів, які за масою можуть значно перевищувати максимальну дозу, яку здатний накопичити шнек у пластикаційному циліндрі при його відведенні в крайнє праве положення. Цим способом переробляють матеріали з високою η і широким інтервалом $T_p \div T_0$.

4.1.1.4. Інжекційне (литтєве) пресування. Метод полягає в двостадійному формуванні виробу з використанням форми з двома ступенями змикання.

На першій стадії здійснюється упорскування потрібної дози розтопу в порожнину форми, яка має збільшений об'єм у порівнянні з об'ємом виробу (1 ступінь змикання) (рис. 4.3). Внаслідок більшої висоти порожнини форми, зімкнутої на 1 ступені, тиск упорскування порівняно невеликий. Друга стадія формування полягає в розтисканні розтопу по порожнині внаслідок кінцевого змикання форми до 2 ступеня змикання за рахунок збільшення тиску у вузлі запирання литтєвої машини.

Такий спосіб дозволяє зменшити тиск лиття на 55 ÷ 70 %. Прес-лиття використовується для виробництва тонкостінних великоформатних виробів, наприклад, грамплатівок. При малій висоті формуючої порожнини внаслідок великого опору течії при звичайному методі лиття потрібно було б створювати тиск лиття 250 ÷ 300 МПа.

4.1.1.5. Лиття під тиском багатоконпонентне. До такого методу відноситься лиття, при котрому в одному гнізді форми одержують виріб монолітний, що складається

щонайменше з двох окремих частин, з'єднаних між собою, але різних за кольором або типом полімеру.

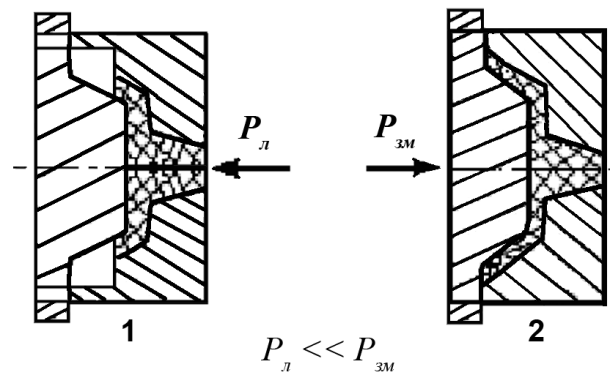


Рис. 4.3. Схема литтєвого пресування

Метод може бути розділений на дві різновидності:

- відкрите лиття, коли окремі частини виробу є видимі, бо виріб формується з того самого матеріалу тільки різного кольору; таке лиття також називають багатоколірним литтям;
- закрите, при котрому видима є тільки одна частина, а інші є внутрішніми; лиття також називають багатополімерним литтям, бо використовують різну сировину.

Багатоколірне лиття. Суть методу полягає в тому, що безпосередньо до форми з окремих пластикаційних циліндрів упорскуються одночасно дози матеріалу з різними кольорами. На першій стадії після замикання форми відбувається підвід пластикаційних вузлів і одночасне упорскування матеріалів, наприклад, червоного (1) і жовтого (2) (рис. 4.4). Наступні стадії циклу ті ж самі, що і при звичайному литті.

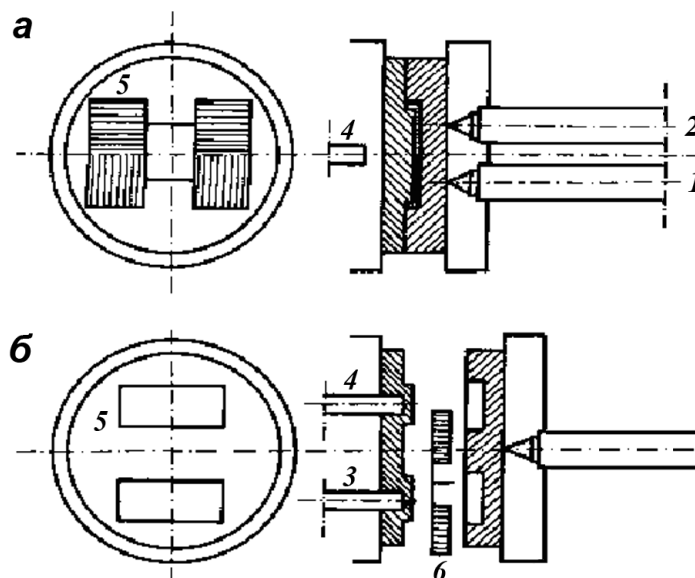


Рис.4.4. Схема двоколірного лиття з паралельним розміщенням литтєвих циліндрів (паралельне лиття): а) вигляд зверху після упорскування; б) вигляд збоку після розмикання і виштовхування відливки

Після розмикання форми виштовхується відливка (6), яка складається з двох двоколірних виробів. Формування двоколірних виробів у двох двогніздових формах є складнішим і полягає, наприклад, у тому, що обидві форми кріпляться до плити, яка виконує циклічні оберти на кут (π рад), а упорскування з обох циліндрів відбувається циклічно з визначеною черговістю.

Триколірне лиття полягає в тому, що на першій стадії процесу відбувається упорскування у верхню частину форми матеріалів 1 і 2. На цей час циліндр для матеріалу 3 є

ще виключений із циклу. На другій стадії здійснюється розкриття форми 5 і обертання плити з формами на кут π рад. На цей час третій циліндр приєднується до циклу і після змикання форми здійснюється упорскування матеріалу з кольором 3 до нижнього гнізда, а матеріалів 1 і 2 до верхнього гнізда.

Після охолодження форма розмикається, виштовхується триколірна відливка з нижнього гнізда, форма обертається на кут π рад і замикається. Після того здійснюється упорскування одночасно з трьох циліндрів і після охолодження – розмикання форми.

Багатоколірне лиття має ряд недоліків:

- дороговартісна складна форма;
- довгий час циклу;
- потрібна відповідна кількість литтєвих машин.

Такий метод є економічно вигідний при великому об'ємі продукції.

Позиційне розміщення литтєвих машин по відношенню до литтєвої форми може бути різним – паралельне, симетричне й несиметричне; паралельно-перпендикулярне й перпендикулярне (співосьове) (рис. 4.5).

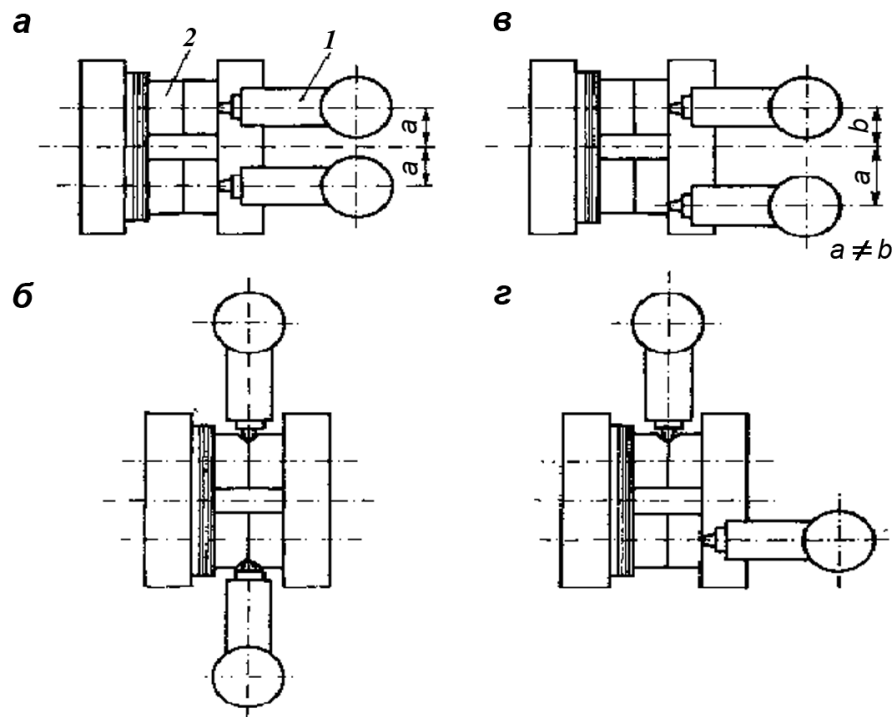


Рис. 4.5. Різновидності двоколірного лиття в двогнізду форму з різним розміщенням матеріальних циліндрів: 1 – вузли пластикації; 2 – форма;
а) паралельне, б) симетричне, в) несиметричне, г) перпендикулярне

Лиття багатокомпонентне закрите. Суть методу полягає в тому, що у форму упорскуються різні матеріали через одну спільну ливникову втулку.

Найпростішим є лиття двоскладове в одногнізду форму із заслінкою (рис. 4.6). На початку лиття заслінка закрита для обох потоків матеріалу А і В, які знаходяться в матеріальних циліндрах різних машин (рис. 4.6, а).

На першій стадії відбувається відкриття отвору С заслінки і підвід циліндра А з наступним упорскуванням матеріалу у форму (рис. 4.6, б). Потім отвір С перемикається і відбувається упорскування матеріалу з циліндра В (рис. 4.6, в). Друга порція матеріалу розтискає до стінок попередню порцію, не розриваючи і не порушуючи монолітності матеріалу А (рис. 4.6, г). Після упорскування циліндри повертаються на висхідне положення. Потім заслінка повертається у початковий стан і тоді проводиться стадія підтискання

матеріалу зовнішнього шару з циліндра А. Після витримки на охолодження при закритій заслінці форма розмикається і виймають виріб. При цьому проводяться стадії пластикації в обох циліндрах для набору дози до наступного циклу.

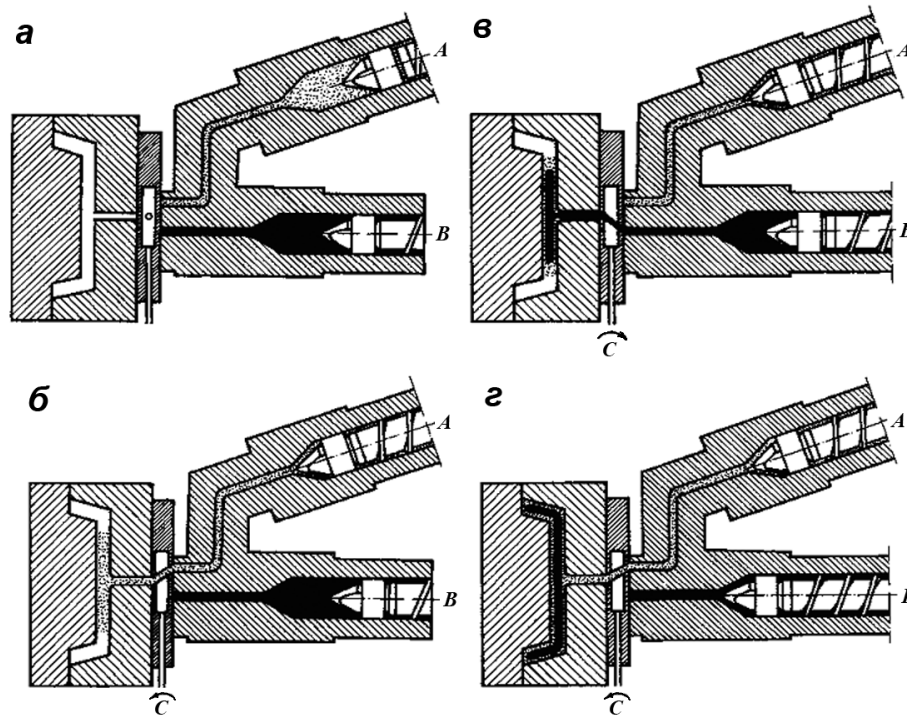


Рис. 4.6. Схема лиття двох полімерів в одногнізду форму із заслінкою:
а, б, в і г – почергові стадії упорскування

Окрім лиття у форму із заслінкою може бути здійснене двокомпонентне лиття через сопло з двома каналами (метод фірми Більйон з Франції) (рис. 4.7). Фірма Нісей (Японія) використала сопло двоканальне з запірними клапанами на кожному каналі для запобігання зливання потоків (рис. 4.8).

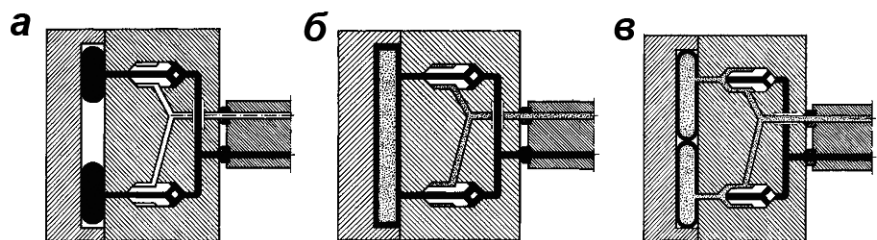


Рис. 4.7. Схема лиття двокомпонентного лиття з індивідуальними розвідними каналами в одногнізду форму: а, б, в – почергові стадії упорскування

Багатоскладникове (багатокомпонентне) лиття дає змогу отримати вироби винятково великих розмірів. Кожний шар у виробі виконує певну функцію, наприклад, зовнішній шар сприймає механічне навантаження, стійкий до стирання і надає виробові міцності і витривалості, а також потрібний естетичний вигляд. Внутрішні шари відіграють роль, в основному, наповнювача, а тому, здебільшого, можуть формуватися з вторинної або ж з дешевої сировини.

Недоліки цього методу ці ж самі, що й попереднього.

4.1.1.6. Лиття під тиском зі спінюванням. Прийнято вважати, що такий метод започаткований на фірмі Юніон Карбайд Корпорейшн (США) у 1966 р. Формування полягало в тому, що посередині пластикаційного циліндра під тиском подається газ, який

розчиняється в розтопі термопласту, з наступним упорскуванням одержаної маси в гніздо форми. Модифікація цього методу – газ подається в гніздо зімкнутої форми, після чого упорскується розтоп полімеру. Стиснений під дією розтопу газ розчиняється в масі полімеру, а надлишок витісняється в бічний циліндр.

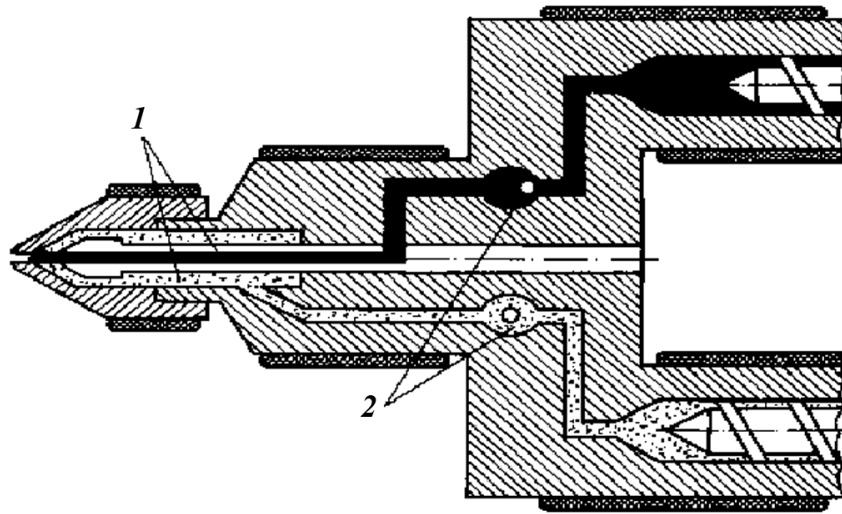


Рис. 4.8. Схема спільного двокомпонентного лиття за методом фірми Нісей:
1 – два канали сопла; 2 – зворотні клапани

Розповсюдженим методом є метод лиття під тиском матеріалу, який містить порофор, введений під час синтезу. Цей метод поділяють на лиття при низькому і високому тискові.

Лиття при низькому тискові (низькотискове). Цей метод полягає в тому, що об'єм дози упорсненого матеріалу з розчиненим газом, який утворюється при розкладі порофору в пластикаційному циліндрі, є меншим за об'єм гнізда форми. При умові низького тиску, який є у формі, газ виділяється з маси, утворюючи тиск 8 МПа, внаслідок чого маса спінюється з утворенням дрібних бульбашок і матеріал зростає в об'ємі, виповняючи весь об'єм гнізда. Найбільше зростання об'єму не перевищує 50 %. Ступінь пористості регулюється кількістю порофору.

При такому способі одержують вироби із шорсткою пористою поверхнею, що може бути й корисним при необхідності імітації, наприклад, дерева. Перевагою такого формування є відсутність западин на поверхні, вирівнювання котрих відбувається за рахунок саморегуляції ступеня спінювання, який залежить від перепаду тисків між внутрішнім об'ємом і зовнішньою поверхнею.

До переваги цього методу належить також висока швидкість упорскування, котра, фактично, залежить від швидкості переміщення шнеку і доходить до 0,5 м/с. В зв'язку із цим час стадії упорскування є дуже малим. Наприклад, на литтєвих машинах Siemag (Німеччина) цей час становить 0,1 ÷ 0,2 с для відливок з масою до 0,5 кг і до 0,75 с при масі 15 ÷ 25 кг. Звідси існує визначення „лиття з вибухом”. Тиск при низькотисковому литті потрібний лише для перемагання опору при течії через сопло та ливникові канали і тому становить 50 % тиску, необхідного для лиття монолітних виробів. Низький тиск лиття сприяє тому, що на замикання форми потрібно невеликі зусилля, що спрощує конструкцію вузла замикання і зменшує енергозатрати. Метод низькотискового лиття використовують для виготовлення великогабаритних виробів.

Вироби мають різну густину за товщиною стінки (рис. 4.9), котра має монолітну тонку оболонку й пористу середину. Густина і міцність на згин виробу залежать від довжини шляху течії розтопу (рис. 4.10). Течія матеріалу не призводить до орієнтації полімеру у

внутрішніх шарах і є чинником орієнтаційних ефектів у зовнішній частині виробу (його оболонці). І цей ефект тим більший, чим довший шлях течії у гнізді.

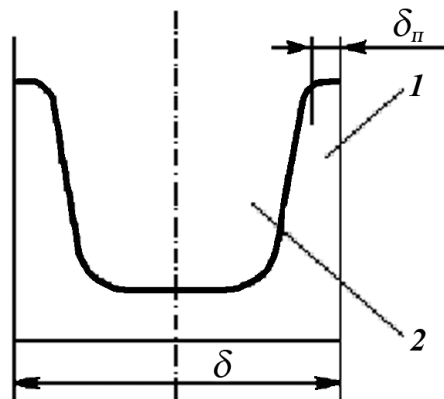


Рис. 4.9. Характерний розклад густини в стінці спіненої відливки:

1 – верхня верства; 2 – сердечник; δ – товщина стінки; δ_{II} – товщина верхньої верстви

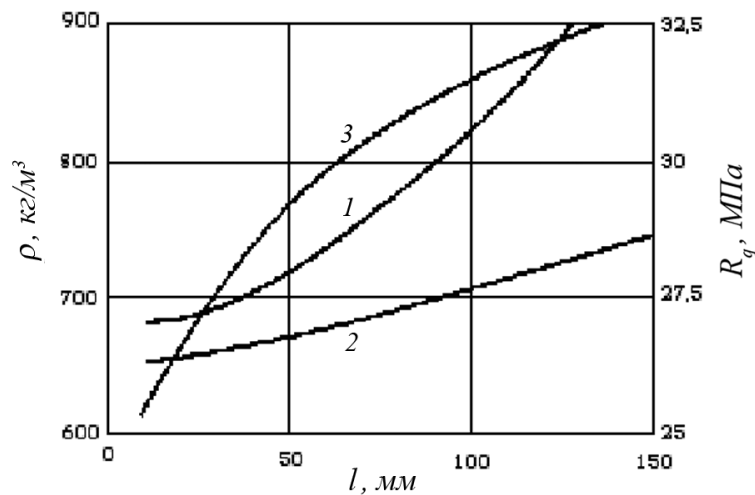


Рис. 4.10. Залежність питомої густини ρ (криві 1 і 2), а також міцності на згин R_q (крива 3) від довжини течії розтопу в формі:

1 – ПА 6 („Tarnamid-21”), 2 – ПА 6 („Itamid 250”), 3 – ПС („Bistan AW”);
навантаження – перпендикулярне до течії розтопу

Крім того, тиск газу спричинює орієнтацію полімеру у радіальному напрямку, що підвищує стійкість виробу до стискування.

Загалом, виріб характеризують коефіцієнтом міцності (B), який визначають із залежності:

$$B = \frac{E_p \cdot \rho_l^3}{E_l \cdot \rho_p^3} - 1, \quad (4.1)$$

де: E – модуль пружності при згинанні; ρ – густина; індекси p і l означають полімер пористий і монолітний.

Лиття зі спінюванням при високому тискові (високотискове). Суть методу в тому, що коли після цілковитого заповнення гнізда форми при упорскуванні і утворенні зовнішньої оболонки при охолодженні, форма частково розмикається. Газ, який знаходиться в об'ємі матеріалу, раптово розширюється, призводячи до спінення внутрішніх шарів матеріалу. Ступінь спінювання регулюється висотою часткового розмикання форми і часом до початку цього розмикання. Збільшити об'єм гнізда також можна за рахунок витягування рухомих вкладок з гнізда замкнутої форми (фірма Тошіба Машін Компані й Асахі Дай).

Відомий також конструкційний розв'язок способу подібно до багатокомпонентного лиття, а саме, роздільне лиття монолітної оболонки й внутрішньої пористої частини виробу. У методі, запропонованому фірмою ICI (В. Британія), спочатку упорскується матеріал монолітної оболонки, який частково заповнює гніздо форми, а потім з другого пластикаційного циліндру упорскується матеріал з порофором. Для забезпечення необхідного ступеня спінення форма після остаточного заповнення частково розмикається (рис. 4.11).

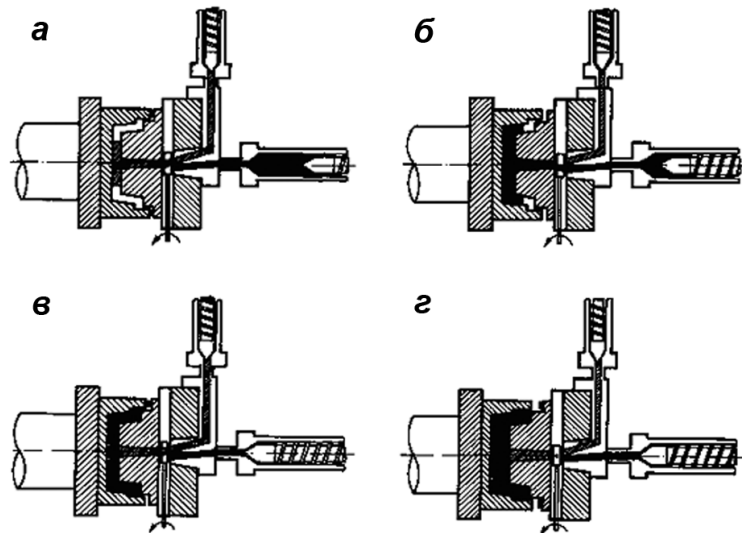


Рис. 4.11. Схема лиття під тиском зі спіненням згідно методики фірми ICI:

- а) упорскування верхньої верстви; б) упорскування серцевини;
в) дотиск верхньої верстви; г) спінювання

Різновидністю цього методу є метод лиття через двоканальне сопло (фірма Батенфельд – Німеччина). Матеріал серцевини може бути наповнений наповнювачем, що проводить струм, наприклад, сажею, яка дає ефект екранування електромагнітного опромінення.

До лиття із спіненням також відносять метод, при якому до форми упорскується частина дози монолітного матеріалу, а потім через сопло чи отвір у формі під тиском подається інертний газ (наприклад, азот), після чого упорскується решта матеріалу. Метод цей має назву GIP (Gas Injection Process). Цим методом отримують порожнисті вироби (литтєві машини фірма Манесман Демаг – Німеччина).

На фірмі Семаг пористі вироби формують при одночасному упорскуванні матеріалу з порофором і без нього; формування відбувається завдяки спеціальній конструкції ливникового двоканального сопла.

4.1.1.7. “Сендвіч-лиття”. Метод полягає в тому, що крім двостадійного змикання форм проводять послідовне упорскування двох матеріалів – без і зі спінюючими додатками (стадія 1), після чого створюється тиск формування (стадія 2). При такому способі отримують полегшені вироби, які не поступаються за міцністю виробам без поропласту. Це зумовлено тим, що в них зовнішня оболонка утворена з полімеру без пор, у якому макромолекули орієнтовані в напрямку тиску формування і радіального тиску від утворення газу. Ці вироби можуть витримувати великі навантаження.

Спосіб перспективний тому, що полегшення виробів є економічно вигідним, оскільки економиться до 30 % полімеру. Крім того, внутрішній шар можна формувати з недефіцитних, дешевих марок полімеру або вторинної сировини. Послідовність упорскування така: а) матеріал внутрішнього шару (серцевини) зі спінюючими додатками; б) матеріал оболонки (без додатків).

4.1.1.8. Гарячеканальне лиття. Метод полягає в тому, що для формування виробу використовують форми, у яких нагрівається ливникова система. Температура розтопу в ливниках підтримується близькою до температури, яка є в матеріальному циліндрі. Внаслідок цього розтоп не загусає в каналах і тому, у порівнянні з холодноканалним литтям, зменшується опір течії. У цьому випадку потрібний менший тиск лиття, що знижує енерговитрати на процес. Крім того, економиться матеріал, оскільки виріб видаляється з форми без ливників. При такому способі утворюються вироби з меншою концентрацією орієнтаційних напружень і з підвищеним глянцем поверхні. Спосіб використовують для виготовлення виробів великої площі, а також тонкостінних виробів. Він не придатний для переробки полімерів з низькою термостабільністю, оскільки матеріал перебуває в ливниках тривалий час у в'язкотекучому стані при високій температурі лиття.

4.1.1.9. Лиття під тиском реактопластів. Основна відмінність від лиття термопластів полягає в тому, що форма нагрівається до температури ефективного затвердження зв'язного ($180 \div 190$ °C), а температура матеріального циліндру не перевищує 100°C (для переходу реактопласту у в'язкопластичний стан). Використовують литтєві машини з індексом "Р" у назві. Вони оснащені шнеком зі зворотною конусністю та мають нагрівачі циліндра з рідким теплоносієм.

4.1.2. Вироби, які виготовляють литтям під тиском

Литтям під тиском виготовляють вироби масою від десятих відсотка грама до 100 кг (литтєві машини італійської фірми "Friulzi"), що відзначаються широким асортиментом за матеріалом, конструктивними особливостями, а також за призначенням. Цим методом не виготовляють деталі, які можна одержати більш продуктивними методами екструзії (плівки, профілі, а також порожнинні вироби великих об'ємів).

Вироби, що виготовляються литтям під тиском, відзначаються підвищеною точністю геометричних розмірів. Наприклад, можна виготовити зубчасте колесо для електронних приладів з точним профілем зуба й зовнішнім діаметром 1 мм при відхиленні ± 5 мкм. У той же час можна виготовити й великогабаритні вироби (корпуси телевізорів, окремі частини корпусів автомобілів і літаків). Литтям під тиском виготовляють вироби із великим ступенем різновісності з різною, найрізноманітнішою арматурою, з наповнених і армованих пластмас.

У той же час слід пам'ятати, що цей метод виготовлення виробів з пластмас пов'язаний з великими витратами на обладнання й оснащення і його краще не використовувати при виробництві дрібносерійних партій виробів.

4.1.3. Матеріали. Вимоги до пластмас, які переробляють литтям під тиском

Литтям під тиском можна переробляти практично всі ті полімери, які переходять у в'язкотекучий стан. До таких матеріалів належить основна маса термопластів і ряд марок реактопластів.

Для підвищення пластикаційної продуктивності литтєвої машини використовують гранульований матеріал. До складу гранул окрім полімеру входять стабілізатори, пластифікатори, барвники, наповнювачі, мастильні речовини. Вибір складу полімерної композиції визначається типом базового полімеру і залежить від призначення виробу, його конструктивних особливостей, технологічних можливостей обладнання, конструкції оснащення.

В основу конструктивних особливостей виробу ставиться товщина його стінки. Розрізняють тонко- і товстостінні вироби. Критерій оцінки товщини виробу – відношення товщини його стінок до площі поверхні. Для тонкостінних виробів це відношення менше за

0,003, а для товстостінних – перевищує 0,003. Практично тонкостінними вважають вироби з товщиною стінки до 3 мм. Максимальна товщина, яка може бути досягнута при литті, становить 20 мм.

При виготовленні товстостінних виробів матеріал повинен характеризуватися малим часом заповнення форми (мати високу текучість) і охолодження.

При формуванні тонкостінних виробів крім вищезгаданих умов повинна бути забезпечена умова невеликої орієнтації макромолекул полімеру при заповненні форм. Це можливо при використанні полімерів з незначною залежністю в'язкості розтопу від температури і, бажано, з низьким значенням енергії активації в'язкої течії.

Як бачимо, вимоги до матеріалів суперечливі, їх дотримання значно впливає на перебіг технологічного процесу. Так, більша текучість забезпечується вищою температурою розтопу й форми, але в цьому випадку значно зростає час охолодження. Менший ступінь орієнтації забезпечується нижчою в'язкістю (зменшенням ефекту загущення при попаданні розтопу у форму). Цей ефект також можливий при підвищенні температури лиття і характерний для полімерів з низькою енергією активації в'язкої течії. Підвищення температур деколи неможливе через зростання ймовірності деструктивних процесів.

Суперечливі вимоги, які ставляться до пластмасових композицій при литті під тиском, забезпечуються в основному реологічними характеристиками перероблюваних полімерів і їх будовою.

Полімери повинні характеризуватися, по можливості, нижчою в'язкістю розтопу й більш вираженою аномалією в'язкості при течії (1), оскільки це зумовлює інтенсифікацію лиття (рис. 4.12). Згадаймо, що в реологічному рівнянні $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}^n$ має велике значення $\eta = f(\dot{\gamma})$.

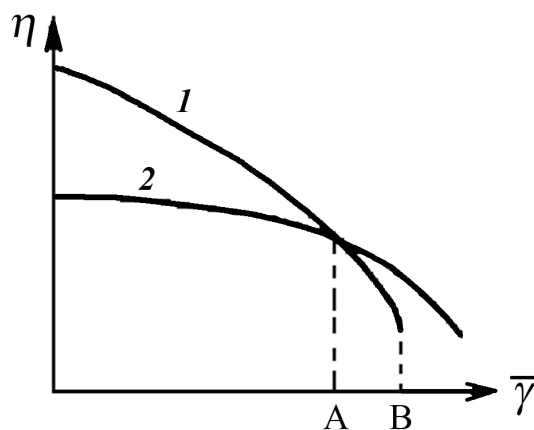


Рис. 4.12. Залежність в'язкості від швидкості зсуву для різних типів полімерів

Інтервал АВ більш придатний для лиття полімеру 1, а для полімеру 2 значне збільшення швидкості, а отже і тиску, не бажане (η мало змінюється), оскільки викличе лише зростання енерговитрат.

Розглянемо все це на прикладі поліолефінів. Вони характеризуються високою в'язкістю, яка до того ж мало залежить від температури. Тому для лиття використовують ті марки матеріалу, які характеризуються меншою молекулярною масою полімеру (оскільки $\eta = C \cdot M^a$), вищим ступенем кристалічності, а в зв'язку із цим – більшим значенням ПТР. Найбільш вживані для лиття марки поліетилену мають ПТР = 0,7 ÷ 7,0 г/10 хв. Марки з ПТР < 0,7 г/10 хв використовуються для виробництва лише товстостінних виробів (наприклад, корпуси вентилів, фітинги). Коли ПТР ≥ 7 ÷ 20 г/10 хв, то матеріал використовують для виробництва тонкостінних виробів з підвищеним глянцем поверхні.

Слід зазначити, що надмірно висока в'язкість розтопу поряд з підвищенням енергосилових параметрів процесу і погіршенням заповнювання форми може бути причиною “підгоряння” полімеру (часткової деструкції) в зв'язку зі збільшенням тривалості перебування його в матеріальному циліндрі при високій температурі.

Крім ПТР для оцінки литєвих марок матеріалу інколи використовують “шлях течії”, що визначається шляхом, який проходить розтоп до застигання в каліброваному капілярі спіралеподібної форми при інжекції (упорскуванні) у різних умовах. Ця характеристика використовується при визначенні можливих габаритів виробу. Для прикладу приведемо шлях (L_c) для ПЕВГ (капіляр трапецієвидний з основою 2 мм):

ПТР	при $P = 50$ Н, 190°C – L_c (см):	0,35	1,9	11,7	21,7	27,0
	при $P = 75$ Н, 1250°C – L_c (см):	21,0	24,7	37,8	46,9	48,1

L_c залежить від T , P , $\lg \bar{\gamma}$ і в меншій мірі від T_{ϕ} , однак відчутно залежить від геометрії каналів. Залежність L_c від $\lg \bar{\gamma}$ показує значний вплив часу упорскування на шлях, який безумовно залежить від габаритів виробу, в основному від δ (товщини стінки). Для більшості марок ПЕ відношення $K = L_c / \delta = 30 \div 350$; при підвищених T , P – числове значення K може досягти 800.

Як бачимо, при розробці технологічного процесу лиття під тиском має велике значення правильний підбір матеріалу для виробництва виробу конкретної конфігурації.

4.1.4. Технологія лиття під тиском термопластів

Типовий технологічний процес лиття під тиском розробляють з метою виготовлення доброякісних виробів, підвищення продуктивності праці і зменшення енерго- і трудовитрат при використанні однотипної сировини. Може бути організоване як безперервне (автоматизоване), так і періодичне виробництво. Типовий технологічний процес складається із ряду послідовних стадій:

1. приймання, транспортування і складування сировини;
2. контроль технологічних властивостей сировини;
3. стадія підготовки сировини;
4. транспортування сировини технологічною лінією;
5. стадія формування виробу;
6. механічна обробка відливки;
7. термообробка виробу;
8. контроль якості продукції;
9. транспортування і пакування виробів;
10. складування виробів.

У сучасних умовах виробництва обов'язковою є стадія переробки (утилізації) технологічних відходів і підготовки вторинної сировини до виробництва.

4.1.4.1. Вимоги до транспортування і складування

Сировина надходить на завод у цистернах, контейнерах чи мішках. При їх транспортуванні і складуванні необхідно уникати попадання води, мастил та прямого сонячного проміння. Зберігається сировина на складі в штабельованому вигляді за однотипними партіями, коли вона затарована в мішки, і – у силосних ємностях при довозенні її на завод у цистернах чи в контейнерах. Термін зберігання на складі – вісім років для неполярних і негіроскопічних матеріалів, три роки – для гіроскопічних.

На виробництві здійснюється вхідний (на відповідність державним стандартам) і біжучий (під час запуску і ведення виробництва) контроль сировини. Під час біжучого

контролю визначають вміст вологи й технологічні характеристики сировини з метою корекції технологічного режиму.

Підготовка сировини полягає в її підсушуванні. Полімерні композиції повинні мати допустимі значення залишкової вологи: ПВХ – 0,3 %; поліформальдегід – 0,1 ÷ 0,2 %; поліолефіни, ПС, АВС кополімери – 0,1 ÷ 0,5 %; полікарбонати, поліаміди, поліарилати – 0,01 ÷ 0,015 %.

Основну масу термопластів сушать при 60 ÷ 80 °С в сушарках протягом кількох годин. Гігроскопічні полімери сушать при 80 ÷ 120 °С у вакуум-гребкових сушарках (додаток 7).

Крім підсушування можливі додаткові змішування з метою укрупнення партій або введення технологічних додатків (барвників, стабілізаторів, наповнювачів). Фарбування, як правило, проводять, змішуючи термопласт з концентратами барвників. Для забарвлення до сировини вводять 0,2 ÷ 1,5 % концентрату до прозорих композицій і 1 ÷ 2 % – до непрозорих. Можливе фарбування шляхом обпудрювання гранул порошкоподібним барвником у барабанних змішувачах. Барвники додаються до полімерної сировини в кількості до 0,3 % від загальної маси.

4.1.4.2. Подрібнення відходів і підготовка вторинної сировини

Стадію проводять з метою економії матеріалів і суттєвого зменшення забруднення навколишнього середовища.

Відходи (технологічний брак, ливники, грат) подрібнюють на спеціальних (молоткових, щоккових чи роторно-ножових) дробарках; подрібнений матеріал очищають від забруднення стиснутим повітрям, промивають водою; металеві домішки видаляються на магнітних сепараторах. Отримують матеріал з розміром частинок 5 ÷ 8 мм, який підсушують і подають на екструзійний агрегат для гранулювання. Гранули (вторинну сировину) повертають у виробництво у вигляді додатка до основної сировини в кількості 10 ÷ 30 %. Після змішування з основною сировиною проводять повторне визначення технологічних характеристик з метою встановлення технологічного режиму переробки одержаної суміші. Безумовно, полімер після переробки буде відзначатись іншою молекулярною масою і будовою внаслідок механо- і термодеструкції. Тому вторинну сировину не використовують для виробів спеціального призначення, а створюють лінію виробництва товарів широкого вжитку.

Переробка і використання вторинної сировини – основа безвідходних технологій, які нині є основним напрямком розвитку народного господарства.

4.1.4.3. Транспортування сировини до складу і технологічною лінією до машин

Сировина транспортується за допомогою електрокарів, пневмотранспортом або стрічковим конвеєром. Використання пневмотранспорту чи конвеєра перспективне, оскільки дозволяє автоматизувати виробничу лінію.

4.1.4.4. Завершальні стадії, механічна обробка

При розробці технологічного процесу стадію механічної обробки потрібно звузити до мінімальних операцій або взагалі усунути. На цій стадії після формування на литтєвій машині в більшості випадків здійснюють відділення ливникової системи від виробу, зачищення переливок, фрезерування складних пазів і для свердління отворів на механічних станках або роботизованих автоматах.

Термообробка (термовідпал). Цю стадію проводять з метою зменшення внутрішніх напружень. При цьому виріб нагрівається до температури понад T_c і повільно охолоджується (0,5 ÷ 1°С за хв). Мета термообробки: максимальна релаксація внутрішніх напружень, зміна

надмолекулярної структури чи ступеня кристалічності полімеру, а, отже – стабілізація фізико-механічних властивостей виробів. Термообробку проводять для виробів з великим ступенем різновтовщинності та для великогабаритних виробів.

4.1.4.5. Стадія формування виробів

Процес формування виробу складає цикл, який об'єднує ряд послідовних операцій:

1. пластикація (топлення матеріалу, його гомогенізація і дозування – накопичення розрахованої дози розтопу);
2. змикання форми і підвід вузла упорскування;
3. упорскування матеріалу;
4. витримка під тиском;
5. витримка на охолодження виробу;
6. розмикання форми і зняття виробу;
7. технологічна пауза на підготовку оснащення.

Розглянемо суть і призначення кожної операції:

Пластикація. Здійснюється періодично після упорскування чергової порції розтопу й витримки під тиском. Стадія призначена для набирання чергової порції гомогенного розтопу шляхом переведення гранульної (чи порошкової) полімерної композиції зі склоподібного стану у в'язкотекучий та нагрівання до температури лиття при переміщенні її вздовж матеріального (інжекційно-пластикаційного) циліндра литтєвої машини. Пластикація включає топлення, гомогенізацію і дозування.

Топлення полімеру відбувається в циліндрі за рахунок: передачі теплоти від його нагрітих стінок, внаслідок дисипації енергії в'язкої течії розтопу в каналах шнеку та від тертя матеріалу об стінки циліндра, шнека, а також окремих частинок між собою.

Процес топлення включає:

- а) прогрів матеріалу за рахунок теплопередачі від нагрітого матеріального циліндру до сировини при поступальному русі шнека в момент упорскування;
- б) об'єднаний нагрів (конвективний і внутрішній) при пластикації (гомогенізації) і дозуванні в момент обертання шнека.

Температура на виході зі шнека складається з температури, досягнутої матеріалом за рахунок теплопередачі, і температури від енергії в'язкої течії розтопу при обертанні шнека:

$$T_p = T_u + N \cdot a + P \cdot b, \quad (4.2)$$

де: T_u – температура стінки циліндра; P – тиск пластикації; N – кількість обертів шнека, об/хв; a , b – коефіцієнти, які залежать від природи полімеру, наприклад, для каучуків: $a = 0,07 \div 0,4$; $b = 0,5 \div 1,5$.

Етапи гомогенізації і дозування суміщені і відбуваються тоді, коли шнек, який обертається, відходить за рахунок тиску, що створюється в накопиченій на кінцевому шнека дозі розтопу. Доза набирається на виході зі шнека при його обертанні. Дозування здійснюється, як правило, після закінчення витримки під тиском попереднього циклу і узгоджується із тривалістю витримки на охолодження виробу і розмикання форми. Для покращення гомогенізації розтопу часто на шнек за допомогою вузла упорскування подається деякий тиск – тиск підпору. У результаті тиск у накопичувальній дозі повинен бути вищим, щоб перемістився шнек. При такому методі для запобігання перетікання розтопу в зворотному напрямку на хвостовику шнека ставлять запірний пристрій. Слід зауважити, що при підвищеному тиску зменшується швидкість обертання шнека, що є основою покращення гомогенізації розтопу в каналах, але спричинює подовження циклу лиття у випадках, коли стадія охолодження короткотривала.

Об'єм накопиченої дози характеризує продуктивність вузла пластикації, яка повинна бути не меншою:

$$Q_n \geq (n \cdot G_g + G_l) / (\tau_{охол} + \tau_{розм}), \quad (4.3)$$

де: n – гніздність форми; G_g і G_l – маса виробу і ливників; $\tau_{охол}$, $\tau_{розм}$ – час охолодження і час розмикання форми.

При дозуванні важливим є встановлення правильного об'єму дози, оскільки недостатня доза призведе до недоливок, а надто велика може бути причиною великої переливки при упорскуванні й підгоряння матеріалу в циліндрі через подовжений час перебування його при високій температурі протягом всього наступного циклу формування. Доза розтопу регулюється за допомогою ходу шнека. Максимальна доза залежить від геометрії пластикаційного вузла:

$$M_{\max} = \pi \cdot d^2 / 4 \cdot L_{\max} \cdot \rho_{\max}, \quad (4.4)$$

де: d – діаметр циліндра; L_{\max} – максимальний хід шнека; ρ_{\max} – максимальна густина розтопу.

Слід зазначити, що точність дозування залежить і від тиску пластикації: вона зменшується зі зростанням тиску підпору. У зв'язку з тим, що від пластикації залежить якість виробу та продуктивність процесу, до неї ставляться чіткі вимоги, основними серед яких є:

1. Максимально можлива густина розтопу (мінімальна пористість).
2. Максимально можлива точність і відтворюваність дози в кожному циклі.
3. Висока однорідність розподілу температури в об'ємі дози.
4. Точність досягнення розрахованої температури розтопу для лиття.
5. Мінімальні деструктивні процеси та інші хімічні реакції в усьому об'ємі дози, які спричинюють зміну хімічної будови та молекулярної маси полімеру.

Змикання форми і підвід вузла упорскування. Власне із цієї операції починається цикл лиття. Змикання здійснюється після встановленої технологічної паузи, яка передбачена після зняття виробу (для можливого очищення форми, її змащування антиадгезивом). Форма змикається внаслідок переміщення рухомої плити машини, на якій закріплена рухома півформа. Після змикання перевіряють правильність зімкнення форми: відсутність перекосів, зазорів між півформами, а також повне спрямлення важелів запирання. При змиканні необхідно створити зусилля запирання, яке б запобігло розмиканню (розгерметизації) форми при упорскуванні матеріалу:

$$N_{зм} > P_{\phi} \cdot (F_g \cdot n + F_l), \quad (4.5)$$

де: P_{ϕ} – тиск в формувальній порожнині форми, який усереднений за площею відливки в площині роз'єму (F_l^{yup}): $P_{\phi} = P_{yup} / F_l^{yup}$; F_g і F_l – відповідно площа виробу і ливникової системи в площині розмикання форми; P_{yup} – тиск формування на виході з впускного каналу і дорівнює: $P_{yup} = (0,4 \div 0,6) P_l$; де P_l – тиск лиття (розвивається у матеріальному циліндрі під час упорскування).

Підведення вузла упорскування до форми здійснюється окремим механізмом, який переміщує весь матеріальний циліндр до упору сопла в ливникову втулку (деколи можливе переміщення форми до циліндра при її змиканні). Внаслідок цього сопло циліндра упирається в ливникову втулку форми і створюється необхідне зусилля притискання, яке запобігає витіканню розтопу. Для надійності операції слід стежити за співвісністю сопла і втулки, а також за відповідністю їх діаметрів сферичності. Коли сфера сопла більша від сфери ливникової втулки, утворюється так званий грибок, який затримує центральний

ливник при розмиканні, внаслідок застигання матеріалу в створеному проміжку між втулкою і соплом.

Упорскування розтопу. Заповнення литтєвої форми є визначальним етапом литтєвого формування. Загальною вимогою для всіх полімерів під час цього процесу є повне заповнення порожнини форми монолітним і якомога одноріднішим розтопом. Причому його стан має бути таким, щоб залишкові напруження в затвердженому виробі були мінімальними. При литті під тиском термопластів гарячий розтоп упорскують в холодну форму із температурою завжди вищою від кімнатної, але набагато нижчою ніж температура розтопу. Тому заповнювання порожнини форми відбувається з безперервним охолодженням розтопу. При цьому його в'язкість зростає від визначеного (реологічно необхідного) значення аж до "нескінченності" (відповідає в'язкості твердого тіла) у точці T_c чи $T_{кр}$. Природно, що шлях розтопу, а, отже, і час упорскування, залежатимуть від температуропровідності полімеру. Чим вона більша, тим вища швидкість наростання в'язкості і, внаслідок цього, менший шлях розтопу. Максимальний шлях розтопу залежить і від висоти порожнини форми. При певному температурному режимі й однакових геометричних параметрах оснащення об'ємну витрату матеріалу при упорскуванні можна обчислити за формулою:

$$V_p = \frac{G}{\rho_p \cdot \tau_{упр} \cdot C}, \quad (4.6)$$

де: $\tau_{упр}$ – відомий час упорскування (в паспортних даних машини); C – число ливникових каналів; G – маса відливки; ρ_p – густина розтопу.

Під час упорскування, яке відбувається під дією високого тиску лиття, розтоп з високою швидкістю саморозігрівается в ливникових каналах внаслідок дисипації енергії в'язкої течії. Тому температуру, з якою потрапляє розтоп у форму, можна розрахувати за формулою:

$$T_p = T_u + \frac{\sum \Delta P_n}{C_p \cdot \rho_p}, \quad (4.7)$$

де: T_u – температура розтопу в циліндрі; $\sum \Delta P_n$ – втрати тиску в ливниковій системі, включаючи ливникове сопло; C_p – питома теплоємність розтопу при T_u ; ρ_p – питома густина розтопу при температурі лиття.

Якість заповнення форми значно залежить від швидкості упорскування, геометрії порожнини і температури розтопу й форми.

Зрозуміло, що внаслідок течії в ливниках під дією значного напруження зсуву розтоп додатково гомогенізується.

Витримка під тиском (ущільнення). Після заповнення порожнини форми тиск в формі зростає до тиску формування (P_f), який необхідний для створення потрібної монолітності виробу. Одночасно відбувається суттєве охолодження розтопу, а, отже, збільшення його густини, що призводить до зменшення об'єму (спостерігається усадка). Для компенсації усадки матеріалу у форму надходить під тиском додаткова порція розтопу за рахунок його "підтискання" з матеріального циліндра, у якому визначений час підтримується тиск лиття після упорскування. Витримка практично завершується, коли матеріал застигає у впускних каналах. Отже, за рахунок витримки відбувається додаткове нагнітання розтопу в порожнину форми, де підтримується необхідний тиск формування, внаслідок чого матеріал ущільнюється, що позитивно впливає на фізико-механічні характеристики виробу. Завдяки цьому усувається брак (неточні розміри, утяжини й западини на поверхні). "Підтискання" розтопу можливе при існуванні деякого запасу ходу шнека, який розраховують, виходячи з об'єму дози з урахуванням цієї первинної усадки (збіжності матеріалу при застиганні).

Охолодження виробу у формі. Після витримки під тиском форму витримують необхідний час у зімкненому стані для остаточного затвердіння матеріалу у всьому об'ємі. Температура виробу при розмиканні повинна бути такою, щоб при видаленні не відбувалося його жолоблення чи руйнування (тобто полімер повинен бути в склоподібному стані). Як правило, виріб охолоджується за рахунок конвективного теплообміну шляхом подачі холодоагенту в канали охолодження, які виконані в стінках форми. Фактично охолодження починається відразу після попадання розтопу в порожнину форми. Однак, внаслідок пониженої теплопровідності полімерів перехід їх із в'язкотекучого стану у склоподібний або твердий кристалічний стан в усьому об'ємі відбувається більший (в порівнянні з упорскуванням) час. Швидкість охолодження залежить від геометричних розмірів виробу, його маси, співвідношення температури розтопу й форми, а також від коефіцієнта температуропровідності полімерного матеріалу:

$$\alpha = K \cdot \frac{\lambda}{C_p \cdot \rho_p}, \text{ м}^2/\text{с} \quad (4.8)$$

де: λ – теплопровідність полімеру; K – коефіцієнт пропорційності.

Якість виробу залежить як від швидкості, так і від рівномірності охолодження у всій масі виробу. Це досягається певним співвідношенням $T_f \div T_p$ і конструктивними засобами при проектуванні виробу і оснащення. При проектуванні слід враховувати усадку при охолодженні, внаслідок якої тиск у формі понижується до залишкового ($P_{зал}$), що впливає на зняття виробу. При надто високому тиску виріб може залишатись на пуансоні, або ж “застрягати” у формі, що потребує значно вищих зусиль для виштовхування. У деяких випадках “застряглий” виріб не виштовхується, тому потрібно зупинити процес для механічного видалення виробу. Така ситуація може спричинити руйнування або пошкодження виробу чи ушкодження форми.

Розмикання форми і зняття виробу. Після охолодження виробу форма розмикається. Рухома півформа відходить, як правило, разом з відливкою і стержнем центрального ливника. При досягненні крайнього положення відливка виштовхується за допомогою виштовхувальної системи чи знімається вручну. Ручну роботу слід замінити механічною (наприклад, використання роботів). Після зняття відливки, проводять змащування форми аерозольними антиадгезивними засобами, особливо при переробці полімерів з підвищеною поверхневою енергією (адгезією). Відливка переміщається на стадію механічної обробки або ливники відгинаються на місці.

Висновок. Кожна зі стадій формування окремо впливає на якість виробу. Однак процеси, які відбуваються на цих стадіях, взаємопов'язані і визначають різні вимоги до умов лиття, конструкції оснащення, конструкції і характеристики машин. Так, процеси, які відбуваються на 1-й стадії, визначають вимоги до потужності інжекційної частини машини та її конструкції. Процеси заповнення форми впливають на однорідність полімерної маси у виробі і його надмолекулярну структуру. Режим наростання тиску у формі може вплинути на орієнтацію полімерних молекул, що викличе зміну фізико-механічних властивостей виробу, їх анізотропію. Стадія охолодження найбільш довготривала і впливає на продуктивність процесу. У той же час режим охолодження визначає рівномірність і ступінь релаксації напружень у виробі.

Процес формування виробів при литті може здійснюватись в автоматичному, напівавтоматичному і ручному режимі. Відмінність полягає в керуванні часовими параметрами всіх стадій процесу лиття. Автоматичний режим забезпечує виконання всіх операцій без втручання людини. Напівавтоматичний, як правило, потребує ручного зняття виробу. При ручному режимі керування всіма операціями здійснюється вручну.

Лиття під тиском в автоматичному режимі дозволяє автоматизувати весь технологічний процес, тобто створити повністю автоматизовану лінію – від подачі сировини до пакування. У такому випадку машини розміщують в один ряд, об'єднують спільними транспортними лініями і використовують однакову сировину. З точки зору економіки умовою створення автоматизованої лінії є велика тиражність виробів з однієї марки матеріалу, яка не повинна бути меншою, ніж 0,3 млн.шт/рік.

Важливою умовою повної автоматизації, включаючи пакування, є конструювання оснащення з (автоматичним) безпосереднім відділенням ливникової системи від виробу при розмиканні форми. На декілька порядків зростає продуктивність виробництва, коли для формування використовуються роторно-конвеєрні лінії.

4.1.5. Процеси, які супроводжують цикл формування, і їх вплив на якість виробів при литті під тиском

Найважливіший вплив на весь процес лиття і на якість виробів мають процеси, які супроводжують упорскування розтопу у порожнину форми – заповнення форми.

4.1.5.1. Заповнення формувальної порожнини розтопом

Вироби при литті мають найрізноманітнішу конфігурацію і масу. Для їх оформлення розроблено багато типів оснащення з відповідною ливниковою системою і конфігурацією порожнини. Все це, поряд з реологічними характеристиками розтопу, обумовлює різні механізми заповнення форми. Від реологічних характеристик в першу чергу залежить характер течії, яка залежно від температури і тиску упорскування може змінюватись від псевдоламінарної до псевдотурбулентної. Основні механізми заповнення такі.

Фронтове (ламінарне) заповнення порожнини (рис. 4.13) можливе лише тоді, коли упорскування здійснюється у невисоку порожнину при малій швидкості: $v_{упр}$ – швидкість упорскування; h – висота впускного каналу; H – висота порожнини форми. Отже, заповнення фронтом відбувається, коли $H \cong h$ (незначно відрізняються) і $v_{упр}$ невисока. Радіальна течія розтопу від впускного ливника утворює фронт течії (півколо), який вирівнюється після проходження порожнини. Фронтом є високоеластична плівка, яка розтягується наступними порціями розтопу. Внаслідок охолодження плівки утворюється тонка кірка, через це швидкість течії зменшується, тиск уздовж довжини форми також падає.

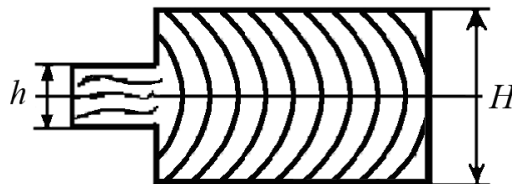


Рис. 4.13. Фронтове заповнення порожнини форми

Струмнинний механізм заповнення спостерігається, коли висота каналу h значно менша за висоту порожнини H , а швидкість упорскування висока, внаслідок чого утворюється струмина, яка звивається, а після дотику до тильної стінки порожнини починає складатись і з'єднуватись між собою (рис. 4.14). Тут також при контакті з холодною стінкою утворюється тонка кірка, але вона може потрапити в будь-яку частину об'єму через звивання струмини, що може викликати утворення в об'ємі маси лінії розділу – холодний спай. Разом з тим при відповідному режимі кірка може розтопитись.

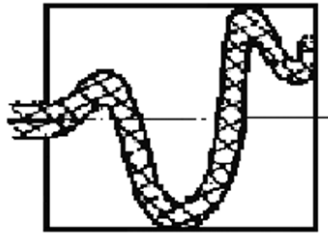


Рис. 4.14. Струминний механізм заповнення форми

Окремий випадок утворення холодних спаїв в об'ємі, коли на шляху потоку розтопу у формувальній порожнині знаходиться знак. В такому випадку потік розділяється, що закономірно, і сходиться після знаку в дещо охолодженому (загущеному) вигляді. Це часто перешкоджає злиттю потоків (утворюється холодний спай – рис. 4.15). Поряд з холодним спаєм за знаком утворюється повітряна камера, яка внаслідок підвищення в'язкості розтопу може зафіксуватись у виробі у вигляді порожнини. Остання може розташовуватись не обов'язково за арматурою (під тиском може переміститись до краю). Основний метод усунення цих явищ, які є небажаними, – підвищення тиску лиття та температур розтопу й форми.

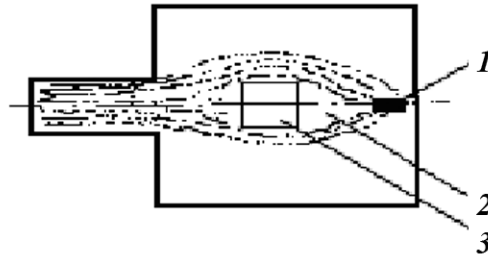


Рис. 4.15. Утворення холодного спаю:

1 – холодний спай; 2 – повітряна порожнина; 3 – знак

Як було сказано вище, характер заповнення форми розтопом залежить від швидкості упорскування, розмірів формувальної порожнини і ливників, в'язкості розтопу. При дуже високій швидкості упорскування майже незалежно від розмірів порожнини і в'язкості розтопу, останній рухається струминою (зигзагоподібною). Після досягнення протилежної стінки струмина завертає, внаслідок чого можливе захоплення повітря й утворення раковин (рис. 4.16). Наявність останніх у виробі знижує його міцність.

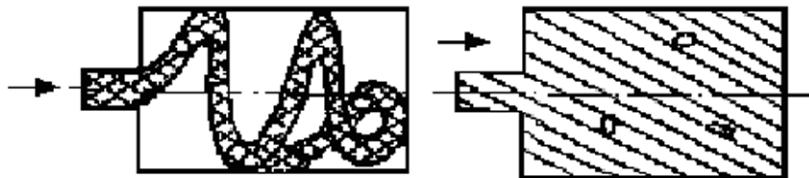


Рис. 4.16. Утворення раковин у виробі при заповненні порожнини струминою

Утворення раковин імовірніше при високій швидкості остигання розтопу й при його високій в'язкості.

У випадку формування тонкостінних виробів переважає заповнення форми суцільним фронтом. Тоді потік розтопу дотикається до стінок форми (її температура значно нижча, а тому остигання біля стінки відбувається швидко) і можливе утворення високоеластичної кірки, у якій макромолекули орієнтуються в напрямку руху потоку (фіксуються при швидкому охолодженні і наростанні в'язкості). Орієнтація в кристалічних полімерах викликає прискорену кристалізацію, яка до того ж завершується на початкових стадіях

внаслідок великої швидкості охолодження. Пристінна орієнтація викликає концентрування орієнтаційних напружень. У внутрішніх шарах орієнтація значно менша або зовсім відсутня. Орієнтаційні напруження є причиною анізотропії властивостей виробу за перерізом – міцність вища в місцях орієнтації. Зменшити пристінну орієнтацію можна підвищивши температуру розтопу: в такому випадку біля стінки виникають менші напруження зсуву (причина орієнтації), оскільки в'язкість розтопу нижча й імовірніша релаксація напружень, які виникають. Однак, при цьому подовжується цикл лиття в зв'язку зі збільшенням тривалості охолодження.

4.1.5.2. Вплив характеру заповнення форми на властивості виробів

Характер заповнення форми суттєво впливає на властивості виробів.

1. Струминний режим заповнення розтопом з високою в'язкістю може призвести до зниження монолітності та міцності виробу через раковинуутворення й внутрішні холодні спаї, які зумовлюють появу внутрішніх напружень.
2. Заповнення форми суцільним потоком розтопу з підвищеною в'язкістю призводить до пристінної орієнтації і різного ступеня кристалізації виробу за перетином, що викликає анізотропію фізико-механічних властивостей (підвищена міцність на розрив у пристінних шарах у напрямку потоку). У полімерах з жорсткими макромолекулами внаслідок різниці орієнтації виникають великі внутрішні напруження, що може призвести до появи мікротріщин.
3. При заповненні форми з арматурою чи прохідним знаком можливе утворення холодного спаю в напрямку руху потоку після арматури і раковини через відсутність руху розтопу за вставкою. Холодні спаї призводять до появи внутрішніх напружень і зниження міцності виробу.

Для зменшення ефекту спаю лиття виконують при підвищених температурах розтопу й форми та з високою швидкістю упорскування (прямопропорційно залежить від тиску упорскування). Також можна використати самозапірні ливникові сопла, які відкриваються після досягнення відповідного тиску. Всі ці заходи подовжують цикл лиття, й, відповідно, знижують продуктивність процесу.

4.1.5.3. Стадії упорскування розтопу й внутрішні напруження

Причини виникнення внутрішніх напружень. Як вже зазначалось вище, внутрішні напруження – це зафіксовані напруження зсуву у вигляді орієнтованих макромолекул. Чим вища в'язкість, тим більша ймовірність виникнення орієнтаційних напружень. Напруження виникають тоді, коли неможлива релаксація напружень зсуву, а релаксація збільшується зі зростанням рухливості полімерних ланцюгів внаслідок конформаційних змін.

Залежно від етапу заповнення форми при упорскуванні можуть виникати різні напруження.

Перший етап: орієнтаційні напруження – перші порції матеріалу попадають на холодні стінки форми, орієнтовані макромолекули в напрямку руху “заморожуються” і такий стан зберігається в тонкому шарі виробу. У товстостінних виробках наступні порції матеріалу розігрівають пристінний шар, що обумовлює релаксацію внутрішніх напружень в ньому.

Другий етап (витримка під тиском): орієнтаційні напруження у внутрішніх шарах, коли проводять підживлення для компенсації усадки (нові порції матеріалу надходять в уже достатньо загуслу масу, внаслідок чого потік орієнтується).

Третій етап: можливе витікання матеріалу після відводу сопла (гарячеканальне лиття), коли у впускному каналі розтоп не застигає. Виникають орієнтаційні напруження в зоні впускного каналу в напрямку витікання.

Четвертий етап: течія в порожнині і орієнтація внаслідок внутрішнього руху макромолекул (внутрішня течія). Внутрішні напруження суттєво впливають на якість виробу, вони можуть призводити до жолоблення, розтріскування його поверхні, зниження механічних властивостей.

На орієнтацію макромолекул і виникнення внутрішніх напружень впливають такі фактори:

- природа полімеру (лінійні полімери, розгалужені, полярні, неполярні, штивні, еластичні)
 - вища концентрація напружень, коли переробляють розгалужені, штивні та полярні полімери;
- надмолекулярна структура (аморфні, кристалічні). Аморфні полімери більш схильні до орієнтації, кристалічні – до різного ступеня кристалізації і появи мікротріщин;
- реологічні характеристики – в'язкість розтопу, залежність в'язкості від температури і швидкості зсуву;
- технологічні параметри лиття під тиском (їх вплив наводиться на рис. 4.17).

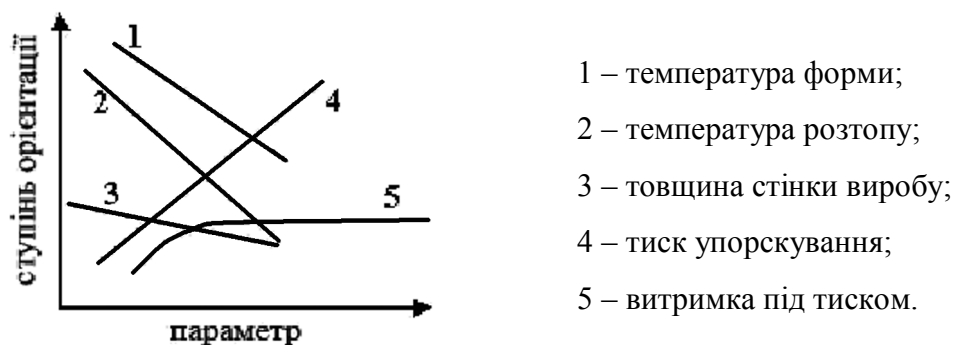


Рис. 4.17. Вплив технологічних параметрів лиття під тиском на ступінь орієнтації макромолекул

Крім орієнтаційних внутрішніх напружень у виробках можуть виникати напруження від нерівномірного (швидкого) режиму охолодження – термічні напруження, а також механічні, які виникають від зусилля виштовхувачів.

Термічні (при охолодженні) напруження виникають при нерівномірному охолодженні по товщині стінки. Утворюється пристінна тверда кірка і матеріал для компенсації напруження між кіркою і наступним шаром розтопу орієнтується в напрямку дії напруження. Ця орієнтація “заморожується” при застиганні з фіксацією напружень.

Термічні напруження також виникають при різнотовщинності виробів, коли в тонкому місці матеріал застигає, а в товстому шарі – залишається ще в розтопі. На межі розподілу виникають внутрішні напруження з орієнтацією в напрямку цієї межі.

При виштовхуванні виробу внутрішні напруження виникають тоді, коли:

- виріб виштовхується до моменту набуття ним потрібної жорсткості;
- занадто високий залишковий тиск у формі при її розмиканні;
- створюються високі зусилля обтискання елементів форми при збіжності (усадці) матеріалу під час охолодження (при обтисканні знаку, пуансону, тощо).

Як бачимо, більшість випадків виникнення внутрішніх напружень можна усунути шляхом підбору правильного режиму лиття та конструкції форми і виробу.

Внутрішні напруження є бажаними, коли потрібна підвищена міцність в одному напрямку. Тоді вони обумовлюють орієнтацію при литті в цьому напрямку вище розглянутими методами.

4.1.5.4. Кристалізація термопластів у формі

Кристалізація має важливий вплив на формування виробів необхідної якості при переробці кристалічних полімерів. Режим кристалізації залежить в першу чергу від температури. Сам процес проходить у дві стадії: зародкоутворення і кристалізація в об'ємі. Утворення зародку відбувається при вищій температурі (рис. 4.18).

У цілому кінетика кристалізації залежить від співвідношення швидкостей зародкоутворення (2) і росту кристалів (1). Як бачимо, швидкість кристалізації екстремально залежить від температури полімеру, яка у свою чергу залежить від співвідношення температур розтопу й форми. Залежно від швидкості охолодження може спостерігатись різний режим кристалізації.

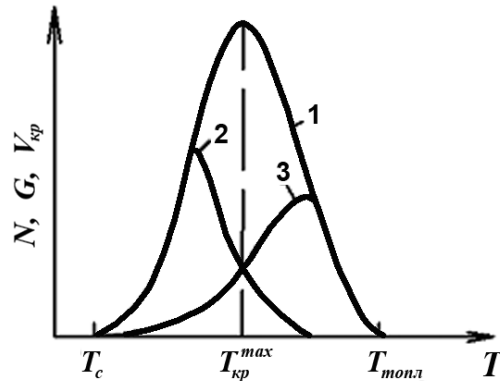


Рис. 4.18. Температурні залежності швидкостей зародкоутворення N (2), росту кристалів G (1) і сумарної швидкості кристалізації $V_{кр}$ (3)

Переохолодження (максимальна швидкість охолодження) може призвести до “аморфізації” полімеру (процес при $T \leq T_c$) – кристалізація зупиняється на низькому рівні зростання надмолекулярних упорядкованих структур. У такому випадку висока ймовірність орієнтаційних внутрішніх напружень. При швидкому переохолодженні можливий також високий ступінь неоднорідності надмолекулярної структури: на поверхні найменш організовані структури зі збільшенням організації до середини. При цьому можлива пристінна орієнтація структурних угруповань (ламелей, стрічок, ланцюгів). Виріб, одержаний у таких умовах може суттєво змінюватись при нагріванні його до температури розм'якшення.

У випадку, коли температура форми близька або дорівнює температурі кристалізації ($T_{кр}^{max}$), настає режим ізотропної кристалізації, який обумовлює максимальну однорідність і ступінь кристалічності в усьому об'ємі; але це надто тривалий процес і використовують його рідко. Нижче (табл. 4.2) наведені температурні характеристики деяких полімерів, серед них – значення $T_{кр}^{max}$. Процес лиття у форму з $T_{\phi} \cong T_{кр}^{max}$ може бути використаний у випадку, коли $T_{кр}^{max}$ полімеру дуже висока і він характеризується низькою швидкістю кристалізації. Таким умовам відповідає поліетилентерефталат (ПЕТ), формування ізотропного виробу з якого можливе при $T_{\phi} \cong 180^{\circ}\text{C}$. При нижчих температурах утворюється більш пластичний і прозорий виріб на основі аморфного ПЕТ.

Найчастіше використовують проміжний режим, коли спостерігається охолодження біля стінки за режимом 1, а всередині – за режимом 2. В такому випадку часткова пристінна релаксація і наступна кристалізація обумовлені внутрішнім розігрівом від середніх шарів. Слід зауважити, що чим більша площа під кривою (3), тим вища здатність полімеру до кристалізації в широкому температурному інтервалі й навпаки. Це використовують для встановлення оптимального режиму охолодження.

Температурні характеристики кристалізації вибраних полімерів

Полімер	T_c , °C	$T_{пл}$, °C	$T_{кр}^{max}$, °C
Поліпропілен	-20	176	65
Поліетилентерефталат	67	265	180
Поліамід 6	45	228	146
Поліамід 6,6	45	264	150
Поліетилен високої густини	-21	136	–

4.1.5.5. Усадка (збіжність) матеріалу при формуванні

При охолодженні матеріалу від температури розтопу (T_l) до кімнатної температури спостерігається усадка (матеріал збігається), яка може бути двох видів: внаслідок тверднення матеріалу (зростання густини) і лінійного (чи об'ємного) звуження полімеру при пониженні температури. Ця усадка проходить, як правило, у різних напрямках по-різному. Вона впливає на точність виробу і визначається за формулою:

$$y = \frac{l_n - l_e}{l_n} \cdot 100\%, \quad (4.9)$$

де: l_n – розмір порожнини форми; l_e – розмір виробу.

Розрізняють абсолютну й відносну усадку, а також усадку первинну й вторинну. Первинна усадка – це усадка матеріалу у формі протягом циклу лиття, вторинна спостерігається при охолодженні виробу до кімнатної температури після виштовхування з форми. Для виробів з термопластів характерна анізотропія усадки, яка дорівнює:

$$A_H(y) = \frac{y_{взд.ф} - y_{попер.ф}}{y_{взд.ф}}, \quad (4.10)$$

де: $y_{взд.ф}$ і $y_{попер.ф}$ – усадка вздовж і впоперек форми відповідно.

Наприклад, для ПЕ: $y_{взд.ф} = 2,8 \div 3,2\%$, $y_{попер.ф} = 1,8 \div 2,0\%$.

У термопластів усадка більша, ніж у реактопластів, і суттєво залежить від надмолекулярної структури полімеру. Для аморфних вона практично залежить від коефіцієнта термічного розширення, у той час як для кристалічних – зростає внаслідок кристалізації. При конструюванні оснащення й при розрахунку формотвірних розмірів дуже важливо врахувати фактичну усадку. У довідковій літературі в стандартах дається інтервал усадки.

Для визначення середньої усадки виробу залежно від природи полімеру можна скористатись рівнянням:

$$y_{сеп} = 1 - \sqrt{\frac{M \cdot V \cdot (P + n)}{R \cdot T - M \cdot B \cdot (P + n)}}, \quad (4.11)$$

де: M – молекулярна маса ланки полімеру; V – питомий об'єм полімеру в умовах формування; P – тиск формування; T – абсолютна температура розтопу; R – універсальна газова стала; B і n – константи, які залежать від природи полімеру (наведені в табл. 4.3).

Усадка може вплинути не тільки на точність виробу, а й на його якість. Так, наприклад, через нерівномірне охолодження виробу у формі з протилежних сторін можлива різна первинна усадка після зняття виробу. Через те що стінки мають різну температуру, у виробі спостерігаються нерівномірні усадкові явища за межами форми під час кінцевого охолодження до температури навколишнього повітря. Тому він згинається в сторону більш нагрітої поверхні, оскільки її розміри змінюються більше (рис. 4.19). Отже, для формування якісного виробу важливе значення має і рівномірність охолодження в формі з різних сторін.

Величини об'ємних параметрів деяких полімерів

№ з/п	Полімер	$n \cdot 10^{-8}$ Па	$B \cdot 10^{-3}$ м ³ /кг
1	ПС	1,8	0,822
2	ПММА	2,1	0,734
3	ПЕ	3,2	0,875

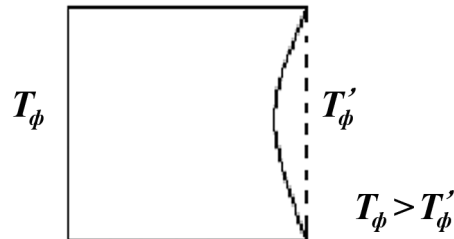


Рис. 4.19. Вплив температури стінки на форму виробу

4.1.6. Технологічні параметри лиття під тиском термопластів

Технологічні параметри поділяються на дві групи:

- перша група – параметри, які визначають стан полімеру в інжекційному циліндрі;
- друга група – стан полімеру у формі.

Першу групу параметрів і режим лиття обумовлюють технологічні характеристики сировини – її гранулометричний склад, текучість, теплофізичні характеристики, аномалія в'язкості (реологічні властивості), в'язкість, температурний інтервал в'язкотекучого стану. До першої групи параметрів належать:

- температура в матеріальному циліндрі (та її поділ на зони);
- час перебування полімеру в циліндрі при пластикації;
- швидкість обертання шнека;
- тиск у циліндрі;
- тиск лиття;
- швидкість упорскування (час упорскування).

Друга група складається з температури форми, тиску у формі, часу витримки під тиском, часу або швидкості охолодження.

Основними технологічними параметрами є:

- температура розтопу та розподіл температур по зонах циліндра;
- температура форми;
- питомий тиск лиття та тиск упорскування;
- тиск в формі;
- час упорскування;
- час витримки під тиском;
- час на охолодження;
- залишковий тиск у формі.

Ці параметри складають технологічний режим лиття термопластів. Вони залежать від технологічних характеристик сировини, конструктивних особливостей оснащення, виробу й енергосилових характеристик обладнання.

Важливим параметром технологічного режиму є час циклу, який визначає продуктивність виробництва і складається з таких складових:

$$\tau = \tau_{зм.ф} + \tau_{упр} + \tau_{охол} + \tau_{розм.ф} + \tau_{відг}, \quad (4.12)$$

де: $\tau_{зм.ф}$ і $\tau_{розм.ф}$ – час змикання і розмикання форми; $\tau_{упр}$ – час упорскування; $\tau_{охол}$ – час на охолодження; $\tau_{відг}$ – час на технологічну паузу.

Значення $\tau_{зм.ф}$, $\tau_{розм.ф}$, $\tau_{упр}$ у виразі є паспортними даними литтєвої машини. Решта – розраховується залежно від природи полімеру і конструкції оснащення (враховуючи температурний режим лиття й охолодження). Найбільший вплив (лімітуючий) має охолодження, як найбільш тривалий процес, через це його інтенсифікація приводить до інтенсифікації всього процесу лиття. У час охолодження входить час витримки під тиском і без тиску.

Час охолодження визначається перепадом температур розтопу й форми та теплопровідністю полімеру на основі закону конвективного теплообміну.

Розрахунок часу витримки на охолодження залежить від типу полімеру і конфігурації виробу. Коли полімер частково кристалічний (ПА, ПЕ, ПП, ПФ), то час на охолодження можна розрахувати аналітично:

$$\text{для стінки циліндричної форми} \quad \tau_{охол} = \frac{0,173 \cdot h^2}{a} \cdot \left[\ln 1,6 - \ln \frac{T_g - T_{охол}}{T'_p - T_{охол}} \right], \quad (4.13)$$

$$\text{для кулі} \quad \tau_{охол} = \frac{0,101 \cdot h^2}{a} \cdot \left[\ln 2,0 - \ln \frac{T_g - T_{охол}}{T'_p - T_{охол}} \right], \quad (4.14)$$

$$\text{для пластини} \quad \tau_{охол} = \frac{0,405 \cdot h^2}{a} \cdot \left[\ln 1,27 - \ln \frac{T_g - T_{охол}}{T'_p - T_{охол}} \right], \quad (4.15)$$

$$a = 2,78 \cdot \frac{\lambda}{C_p \cdot \rho_p}, \quad (4.16)$$

де: a – коефіцієнт температуропровідності полімеру; h – середня половинна товщина стінки в найтовшому перетині виробу; T'_p , $T_{охол}$, T_g – температура, відповідно, розтопу на виході з впускного каналу, стінки форми і виробу в момент розмикання форми ($T_g \approx T_{охол}$); $h = l/2\delta$ – половинна товщина стінки в найтовстішому місці; λ – теплопровідність полімеру.

Потрібно врахувати, що охолодження починається відразу від моменту упорскування, тому час витримки під тиском входить в час на охолодження. Для аморфних полімерів більш придатний графічний метод визначення часу на охолодження з використанням критерію Фур'є:

$$\tau_{охол} = \frac{h^2 \cdot F_0}{a}, \quad (4.17)$$

де: F_0 – критерій Фур'є, який визначається з графічної залежності F_0 від температурного градієнту $\theta = \frac{T_g - T_{охол}}{T'_p - T_{охол}}$, див. рис. 4.20.

Час витримки під тиском впливає на усадку полімеру й фізико-механічні властивості виробу. Цей час залежить від температур розтопу й форми, температуропровідності полімеру і геометрії ливників (впускних). Основне призначення витримки під тиском – компенсація первинної усадки полімеру, яка відбувається при попаданні розтопу в холодну форму. Витримка під тиском проводиться до моменту застигання полімеру у впускному ливнику, тобто до моменту, коли температура в центральній частині ливника досягає значення $T_{охол} < T_m$ полімеру, де T_m – температура текучості полімеру.

Час витримки під тиском можна розрахувати, використовуючи залежність:

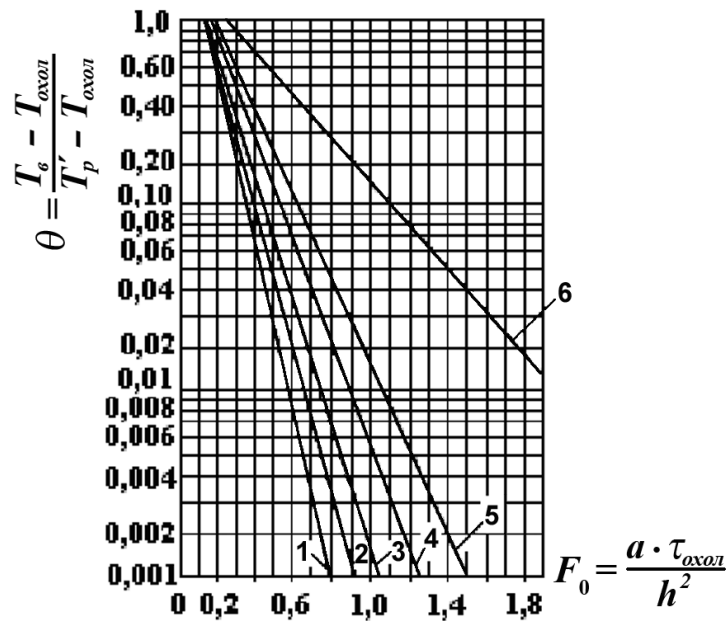


Рис. 4.20. Номограми залежності температурного градієнту від часового фактору:

1 – у центрі кулі; 2 – циліндр ($L \approx D$); 3 – куб; 4 – циліндр ($L = \infty$);
5 – стержень квадратного перерізу; 6 – пластина

$$\tau_{випр} = \frac{K_n \cdot r^2}{5,76 \cdot a} \cdot 2,31 \cdot \lg \frac{1,6 \cdot (T_k - T_{охол})}{T_T - T_{охол}}, \quad (4.18)$$

де: K_n – коефіцієнт, який враховує течію в каналі, $K_n = \xi \Delta V / V_n$; ΔV – об’єм розтопу, який надходить у форму при витримці, залежить від об’ємної усадки розтопу; V – об’єм впускного каналу; ξ – коефіцієнт, який враховує форму ливника, $\xi = 2$ (для циліндра), $\xi = 1,5$ (для щілини і кільця); T_k – температура розтопу в каналі; r – радіус ливника (впускного).

Коли $r > 1/2 \delta$ виробу, то час витримки розраховують:

$$\tau_{випр} = \frac{\delta^2}{\pi^2 \cdot a} \cdot 2,31 \cdot \lg \frac{4 \cdot (T_k - T_{охол})}{\pi \cdot (T_T - T_{охол})}, \quad (4.19)$$

де: δ – товщина стінки виробу.

Чим більший r , тим більший $\tau_{випр}$ і тим менша первинна усадка виробу, оскільки досягається нижча $T_{охол}$ і вища щільність матеріалу.

Час упорскування ($\tau_{упр}$) визначає швидкість упорскування, котра як вже зазначалося, суттєво впливає на режим заповнення форми, структурну орієнтацію й, у кінцевому підсумку, на якість виробу. Як правило, час упорскування є паспортною величиною, яка характерна для даної машини і визначає час переміщення шнека (швидкість поступального переміщення вперед). Час упорскування визначає довжину шляху переміщення розтопу в порожнині і змінюється залежно від неї. Як відомо, для кожного полімеру характерна відповідна довжина шляху перетікання в каналі (див. текучість). Однак, як видно з даних наступного графіка (рис. 4.21), час на проходження розтопом 90 % шляху становить близько 3 с. Наступні 10 % шляху розтоп проходить з експоненціальним сповільненням. Максимальну віддаль у формі потрібно вибирати меншу від $0,9L_{max}$. Час упорскування, закономірно, буде зменшуватись зі зменшенням в’язкості розтопу.

Час упорскування можна вирахувати, виходячи з об’єму упорскування:

$$V_p = \frac{G}{\rho_p \cdot \tau_{упр} \cdot C}, \quad (4.20)$$

де: G – маса всієї відливки; C – число ливникових каналів; ρ_p – питома густина розтопу.

Отже, $\tau_{упр}$ залежить від геометрії форми, температур розтопу й форми, тиску лиття і маси відливки.

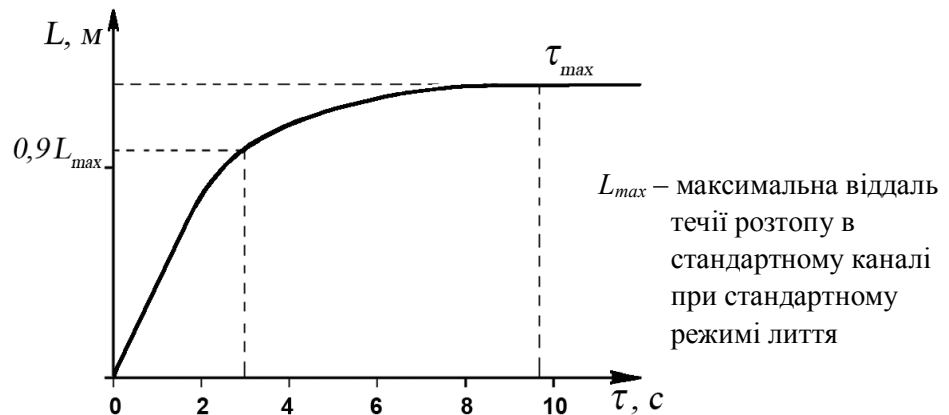


Рис. 4.21. Залежність довжини шляху перетікання розтопу від часу упорскування

Швидкість упорскування впливає на продуктивність процесу і на якість течії розтопу. Існує критична швидкість розтопу, вище якої спостерігається нестационарна течія – порушується стабільність струмини (можливі її розриви, пульсації внаслідок псевдокристалізації). Крім того, у результаті значної дисипації енергії можливі деструктивні процеси. Швидкість упорскування вибирають оптимальною для даного полімеру і конфігурації ливників та виробу (форми).

Отже, час упорскування вибирають в межах $0,5 \div 3$ с. Зі збільшенням розмірів порожнини форми час зсувається в бік більших значень і навпаки. Аналогічна залежність $\tau_{упр}$ від в'язкості розтопу. Для більшості технологічних процесів лиття термопластів час упорскування перебуває в межах $1 \div 2$ с, а наступні операції, як правило, здійснюються впродовж такого часу: $\tau_{випр} - 5 \div 12$ с; $\tau_{охол} - 10 \div 90$ с; $\tau_{зм.ф}$ і $\tau_{розм.ф}$ – у межах $1 \div 2$ с кожний.

Температура розтопу (температура лиття) залежить від природи полімеру, конструкції форми, її гніздності, конфігурації виробу і впливає на час упорскування (лиття), тиск лиття, швидкість охолодження й якість виробу. Температура розтопу повинна забезпечити ефективну гомогенізацію й стаціонарну течію розтопу під час упорскування – швидке, якісне заповнення форми. Вона визначається з температурного інтервалу в'язкотекучого стану полімеру і реологічних характеристик розтопу. Температура розподіляється і зростає за зонами матеріального циліндра – рис. 4.22:

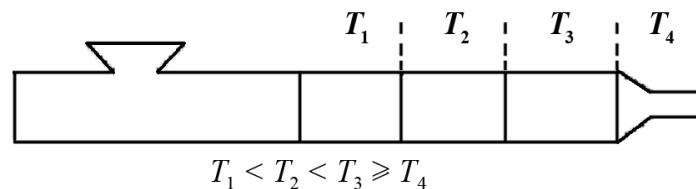


Рис. 4.22. Розподіл температури в зонах литтєвого циліндра і сопла

Приймається, що T_1 , як правило, більша від T_m ($T_{пл}$) на $10 \div 20$ °С, наступні значення T збільшуються з градієнтом ΔT , який залежить від інтервалу в'язкотекучого стану і мінімально дорівнює 10 °С. Для полімерів, в'язкість яких дуже висока, а залежність $\eta=f(T)$ не є крутою, градієнт збільшують до $30 \div 40$ °С. Температура сопла (T_4) не повинна досягати температури деструкції (T_d). Повинна зберігатись така залежність:

$$\Delta T' = T - T_4(T_p) = (20 \dots 30)^\circ\text{C}$$

де: T_p – температура розтопу.

Цю різницю (ΔT) треба враховувати, виходячи з того, що внаслідок втрат тиску при в'язкій течії при стисканні розтопу в ливникових каналах відбувається саморозігрів розтопу за рахунок дисипації енергії (рис. 4.25, крива 3). Підвищення температури внаслідок дисипативних втрат обчислюється із залежності:

$$\Delta T_{\text{дис}} = \frac{\Sigma \Delta P_{\text{л}}}{C_p \cdot \rho_p}, \quad (4.21)$$

$$T'_{\text{форм}} = T_p + \Delta T_{\text{дис}}$$

де: $\Sigma \Delta P_{\text{л}}$ – сумарні втрати тиску при течії в соплі і ливниках; ρ_p , C_p – питомі густина і теплоємність розтопу при температурі лиття.

Підвищені вимоги до величини ΔT дуже важливі для термонестабільних полімерів, наприклад ПА і ПВХ тощо. Для таких полімерів слід обов'язково враховувати дисипативний розігрів при пластикації й упорскуванні (див. формування), тому завжди $T_p = T_{\text{форм}} - \Delta T_{\text{дис}}$.

З підвищенням T_p полегшується заповнення форми, зменшуються орієнтаційні напруження, знижується тиск лиття, підвищується глянець поверхні, але подовжується цикл лиття, зростає усадка, а при надто високій температурі появляються впадини й утяжини на поверхні, можливе зменшення міцності виробу, одночасно зростає переливка (витискання розтопу за межі порожнини).

Температура форми. У виробництві намагаються формувати виріб у максимально охолодженій формі. Однак, як це зазначалось вище, температура форми ($T_{\text{ф}}$) суттєво впливає на режим її заповнення (особливо для тонкостінних виробів) і якість виробу. Ця температура визначає продуктивність виробництва найбільшою мірою. При розробленні технологічного режиму $T_{\text{ф}}$ встановлюють такою, щоб за оптимальний час забезпечити необхідну штивність виробу при його знятті. Вона залежить від теплофізичних характеристик полімеру, його природи, температури лиття (T_p) і може бути розрахована як температура охолоджувальної стінки форми:

$$T_{\text{охол}} = \frac{(T_p \sqrt{\lambda_p \cdot C_p \cdot \rho_p} + T_{\text{ф}} \sqrt{\lambda_{\text{ф}} \cdot C_{\text{ф}} \cdot \rho_{\text{ф}}})}{(\sqrt{\lambda_p \cdot C_p \cdot \rho_p} + \sqrt{\lambda_{\text{ф}} \cdot C_{\text{ф}} \cdot \rho_{\text{ф}}})}, \quad (4.22)$$

$$T_{\text{виробу}} \cong T_{\text{охол}} \leq T_c \quad \text{або} \quad T_M;$$

де: T_c і T_M – температура склування для аморфних і теплостійкість за Мартенсом для кристалічних термопластів; T_p і $T_{\text{ф}}$ – температури розтопу і стінки форми; λ_p і $\lambda_{\text{ф}}$ – теплопровідність розтопу і форми відповідно.

На практиці часто беруть $T_{\text{ф}} = T_{\text{виробу}} - 20$ °С, $T_{\text{виробу}}$ – температура виробу в момент розмикання форми, яка повинна забезпечити його штивність, і повинна бути меншою або рівною T_c для аморфних, або T_M для кристалічних полімерів.

Тиск лиття (питомий тиск і тиск у формі). Високий опір, який виникає при течії розтопу в соплі, ливниках і в порожнині, вимагає високого тиску лиття для забезпечення заповнення форми з потрібною швидкістю, а також для досягнення необхідного ущільнення розтопу у формі. Тиск лиття (тиск у матеріальному циліндрі) визначається залежно від питомого тиску лиття ($P_{\text{лит}}$), який є характерною величиною типу полімеру і залежить від температури. Тиск лиття розраховують з:

$$P_{\text{л}} = P_{\text{лит}} \cdot F, \quad (4.23)$$

де: F – площа перерізу плунжера (шнеку) литтєвої машини.

При течії через ливникову систему спостерігаються значні втрати тиску, тому тиск у формі буде меншим, ніж тиск в матеріальному циліндрі. Втрати тиску залежать від перерізу ливників (r), шляху течії (L), висоти порожнини форми (h), в'язкості розтопу ($\eta_{\text{эф}}$) і зростають при пониженні температури форми ($T_{\text{ф}}$) внаслідок підвищення в'язкості розтопу.

Отже, $P_n = f(\eta_{ef}, L, h, r, T_\phi)$.

На зміну тиску в порожнині форми впливає й режим упорскування (рис. 4.23). Спостерігається безперервний спад тиску в порожнині при литті з використанням звичайних сопел без запірних елементів (крива 2) і фактично тиск мало спадає при використанні самозапірних сопел (крива 1).

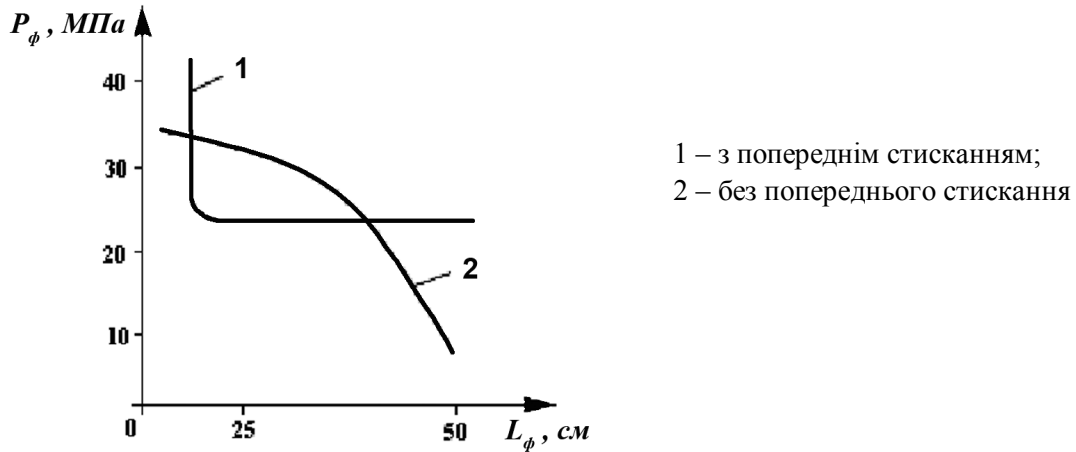


Рис. 4.23. Залежність тиску в формі від довжини порожнини

Попереднє стискання розтопу при використанні самозапірних сопел зменшує нерівномірність розподілу тиску в об'ємі виробу. Тиск у формі менший, ніж тиск лиття, внаслідок втрати тиску у ливникових каналах і в порожнині форми; знаходиться в межах:

$$P_\phi = (0,4 \div 0,6) \cdot P_n, \quad (4.24)$$

Слід пам'ятати, що тиск в формі впливає на усадку при твердненні (застиганні) матеріалу і на фізико-механічні властивості виробу. Вплив на властивості буде розглянуто далі, а на усадку – подано на рис. 4.24.

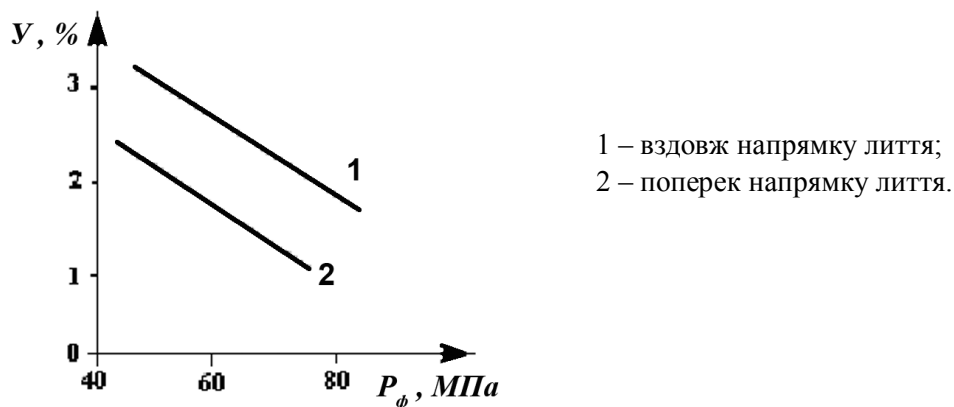
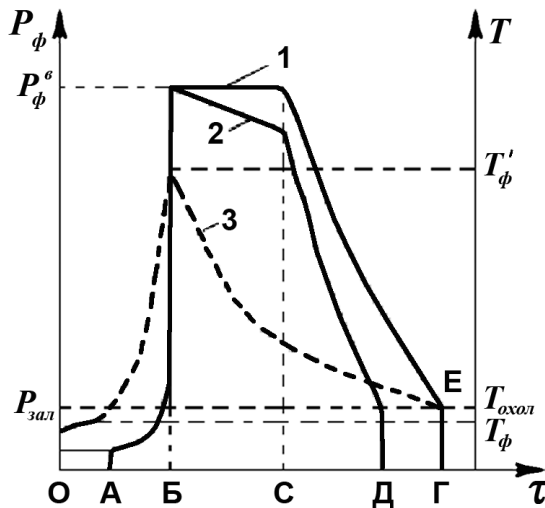


Рис. 4.24. Вплив тиску у формі на усадку (матеріал – ПЕНГ, товщина виробу 4 мм)

Загалом тиск лиття впливає на усадку, режим заповнення форми, орієнтаційні напруження і фізико-механічні властивості, а також – на точність виробу. Тиск лиття (питомий тиск) залежить для конкретного полімеру від T_p і T_ϕ (отже від в'язкості розтопу). При підвищенні цих температур тиск упорскування зменшується. Зі зменшенням в'язкості (при підвищенні температури розтопу) покращується передача тиску у форму (P_ϕ зростає). Зменшення площі перетину ливників і висоти порожнин форми, а також збільшення L_ϕ призводить до того, що P_n збільшується.

При литті під тиском велике значення має залишковий тиск у формі після застигання виробу ($P_{зал}$). Розглянемо циклограму процесу лиття (рис. 4.25).



- 1 – без втрат тиску на нещільності при повній компенсації первинної усадки (шнек має запас ходу);
 2 – з втратами тиску на нещільності форми й неповній компенсації усадки (шнек без запасу ходу);
 3 – зміна температури у формі;

- ОА – заповнення форми;
 АБ – стискання розтопу (ушільнення);
 ВС – витримка під тиском;
 СД (СГ) – витримка на охолодження.

Рис. 4.25. Циклодіаграма лиття при різних режимах

Як бачимо з циклодіаграми, щільність форми і наявність запасу ходу шнека відіграють велику роль у формуванні (впливають на $\tau_{охол}$ і $P_{зал}$). Залишковий тиск у формі в момент розкриття форми (етап ЕГ) повинен мати цілком певне значення. Тому цикл лиття значною мірою залежить від його заданої величини. $P_{зал}$ визначає податливість виробу до зняття і місце знаходження виробу при розмиканні. При необхідності зняття виробу з пуансона $P_{зал}$ повинен бути вищим, ніж при умові зняття виробу з матриці. Надто високий залишковий тиск може спричинити руйнування чи застрягання виробу при розмиканні форми. Цілком зрозуміло, що $P_{зал}$ є функцією тиску лиття та часу охолодження: $P_{зал} = f(P_{унр} \text{ і } \tau_{охол})$. Тому надмірне підвищення тиску лиття (P_l) є небажаним. Разом з тим, лиття виконують при досить високих тисках – 50 ÷ 200 МПа.

В стандартах на полімер і в довідковій літературі наводяться інтервали питомого тиску лиття (див. додаток), а конкретне його значення вибирають залежно від температур розтопу і форми, конструкції форми і виробу, необхідної точності лиття.

Питомий тиск (отже, і тиск лиття в інжекційному циліндрі) можна обчислити із залежності:

$$P'_{лит} = \frac{K}{(0,07 + 0,045K^2 + 0,72K)} \left\{ \frac{(1-Y)^3 R \cdot T_{охол}}{M [\nu_o - b \cdot (1-Y)^3]} - \Pi \right\} + \Sigma P' + \Sigma \Delta P_c, \quad (4.25)$$

де: R – газова стала; ν_o – питомий об'єм полімеру; b – стала, що залежить від природи полімеру; K – коефіцієнт, який залежить від розмірів форми, в'язкості розтопу й температури форми:

$$K = L \cdot (170 / T'_p)^4 / \Phi, \quad (4.26)$$

де: Φ – периметр перерізу порожнини, який перпендикулярний до напрямку лиття; L – довжина формувальної порожнини, починаючи від впускного ливника; $T'_p = T_{форм}$ – температура розтопу в момент упорскування (див. циклограму), яка розраховується з урахуванням дисипації енергії (див. розд. “Формування”); Y – середня первинна усадка виробу у формі; $T_{охол}$ – температура виробу при розмиканні; M – молекулярна маса ланки полімеру; Π – константа (див. розд. “усадка”); $\Sigma \Delta P'$ і $\Sigma \Delta P_c$ – відповідно втрати тиску в ливниках і в соплі (приклад розрахунку див.: IPE Journal. - 1971. - № 8, 27. - Р. 64-69).

Від цих втрат залежить тиск на виході з впускного каналу – тиск упорскування:

$$P_{унр} = P_l - (\Sigma \Delta P' + \Sigma \Delta P_c), \quad (4.27)$$

Знаючи тиск упорскування можна аналітично розрахувати який тиск буде досягнутий у порожнині форми:

$$P_{\phi} = P_{\text{упр}} \cdot (0,07 / K + 0,045 \cdot K + 0,72), \quad (4.28)$$

де: K – розраховують за рівнянням (4.26).

Таким чином, можна аналітично визначити необхідний тиск, який потім перевіряється (уточнюється) експериментально.

Практично, найчастіше використовують дані типових технологічних процесів і стандарти на матеріали для вибору технологічних параметрів лиття, які, як вже зазначалося, уточнюються залежно від конструктивних особливостей форми і виробу, технічних даних машини, технологічних характеристик сировини. У стандартах подані інтервали $P_{\text{лит}}$, T_p і T_{ϕ} , а внаслідок уточнення вибирають конкретні одиничні значення параметрів.

4.1.7. Вплив технологічних параметрів на якість виробів і продуктивність технологічного процесу

В попередніх розділах ці питання значною мірою висвітлені. Так, ми вже знаємо, що температурний режим суттєво впливає на заповнення форми і фіксацію внутрішніх напружень. Одночасно T_p і T_{ϕ} впливають на цикл лиття, продовжуючи його при їх підвищенні. Підвищення температури зменшує енергосилові витрати машини, оскільки потрібний менший тиск лиття. Надмірне підвищення температури розтопу може призвести до великої переливки і браку. На рис. 4.26. подана залежність ударної міцності від температури, а рис. 4.27 ілюструє вплив температури розтопу на граничне напруження розтягу виробу вздовж напрямку лиття.

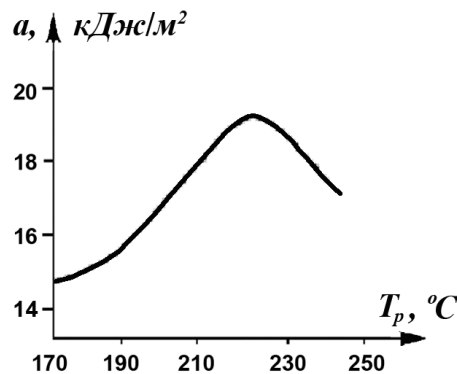


Рис. 4.26. Залежність ударної в'язкості виробів з поліметилметакрилату від температури розтопу (температура форми 30 °C)

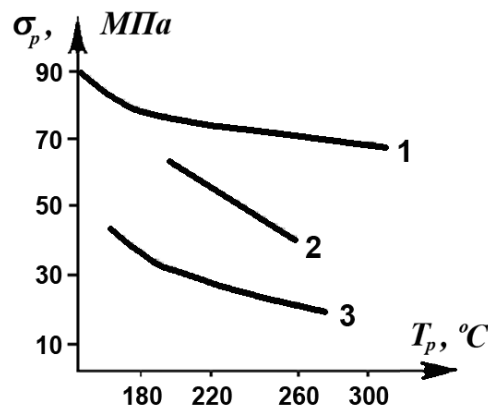


Рис. 4.27. Залежність міцності при розтягу виробів з полімерів від температури розтопу: 1 – кополімер МСН; 2 – ПММА; 3 – ПС блоковий.

Як бачимо, температура розтопу значно впливає на механічні властивості виробів, що одержують литтям під тиском: з її ростом у більшості полімерів знижується міцність при розтягу в напрямку орієнтації, що пов'язано зі зменшенням ступеня орієнтації. З ростом штивності полімерного ланцюга цей вплив послаблюється.

Водночас, чим вища температура розтопу, тим менша анізотропія властивостей за перерізом виробів вздовж і поперек напрямку лиття (при однаковій температурі форми). Одночасно, потрібно зауважити, що підвищення T_p призводить до появи блиску на поверхні.

Підвищений тиск лиття прискорює упорскування, зменшує усадку, подовжує час охолодження до $P_{зал}$. Найбільш ефективно він впливає при значній площі перетину впускного ливникового каналу – у цьому випадку підвищений тиск діє протягом довшого часу. Збільшення тиску лиття сприяє підвищенню міцності виробів, яка зростає тим більше, чим ближча температура розтопу до оптимальної (рис. 4.28).

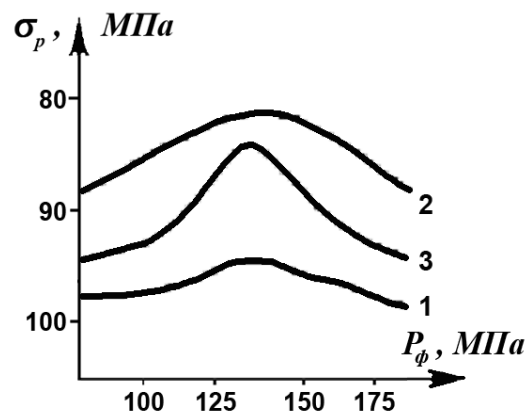


Рис. 4.28. Залежність міцності при розтягу виробів з поліметилметакрилату від тиску в формі і температури розтопу (температура форми 30°C):
1 – 210 °C; 2 – 220 °C; 3 – 230 °C

Міцність виробів, які одержують литтям під тиском, залежить також від температури форми. Для аморфних полімерів цей вплив виражений слабкіше, що пов'язано, в основному, з характером зміни орієнтаційних процесів. При низькій температурі форми застигання відбувається швидко – це фіксує орієнтаційні напруження і сповільнює релаксацію.

На властивості кристалічних полімерів впливає режим кристалізації та ступінь кристалічності, який при цьому досягається. Підвищення температури форми сповільнює процес охолодження і сприяє глибшому процесові кристалізації (при температурах наближених але не вищих до оптимальної $T_{кр}$). Тому з ростом температури модуль пружності й міцність кристалічних полімерів зростають, а відносно подовження й ударна в'язкість зменшуються.

Тривалість заповнення форми (швидкість упорскування), у першу чергу залежить від конструкції литтєвої системи й особливостей конфігурації виробу. Збільшення часу упорскування призводить до охолодження розтопу, зростання в'язкості і підвищення ступеня орієнтації. Зі зростанням швидкості упорскування підвищується температура за рахунок розігріву в соплі. Чим температура вища, тим час упорскування в меншій мірі впливає на усадку матеріалу у формі.

Орієнтаційні напруження характерні для виробів з малою товщиною стінки, а термічні – для товстостінних. Орієнтаційні напруження в готовому виробі без зміни його конфігурації і розмірів не вдається зменшити, тому при виборі режиму лиття необхідно вживати заходи для зменшення ступеня орієнтації, підвищуючи температуру розтопу і швидкість заповнення форми (зменшуючи час упорскування).

Термічні напруження можна знизити зменшенням перепаду температур між матеріалом і формою, зміною конструкції виробу та системи охолодження. Також їх зменшують додатковим прогрівом готових виробів після виймання з форми (термічною обробкою).

Зрозуміло, що конкретний вплив технологічних параметрів на якість готових виробів, усадку і продуктивність процесу в реальних умовах складніший, оскільки ці характеристики комплексно залежать від усіх параметрів. У табл. 4.4 приведені варіанти вибору технологічних параметрів лиття під тиском для покращення якості готових виробів та усунення можливого браку при формуванні.

Таблиця 4.4

Варіанти вибору технологічних параметрів лиття під тиском

Дефект	Тем-ра розтопу (T_p)	Тем-ра форми (T_f)	Розмір дози ($V_{упр}$)	Тиск упорск. ($P_{упр}$)	Час витрим. під тиском ($\tau_{випр}$)	Час витрим. без тиску ($\tau_{охол}$)	Швид. упорск.
Жолоблення	∇	∇	–	∇	Δ	Δ	Δ
Утяжини (впадини)	∇	∇	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ
Внутрішні порожнини	∇	Δ	Δ	Δ	Δ	∇	–
Занижений розмір деталей	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	–	Δ
Підв. розмір деталей	∇	∇	∇	∇	∇	–	∇
Обвуглені ділянки	∇	–	–	∇	–	–	∇
Помітна лінія спаю	Δ	Δ	Δ	Δ	–	–	Δ
Розшарування	∇	Δ	Δ	–	–	–	∇
Позначки: Δ – для покращення підвищити; ∇ – для покращення знизити.							

4.1.8. Види браку при литті під тиском та шляхи його усунення

Основними факторами, які обумовлюють брак, є порушення технологічного режиму або неправильне його встановлення; упущення при конструюванні оснащення; недозволені зміни технологічних характеристик сировини.

Основні види браку при литті під тиском, їх причини та способи усунення наведені в табл. 4.5.

Існують і інші види браку – застрягання виробу у формі (великий залишковий тиск), деформація виробу при виштовхуванні (малий час охолодження, висока температура форми), прилипання виробу (висока адгезія матеріалу, погано змащена форма), глибокі сліди від виштовхувачів (великий тиск виштовхування, малий час охолодження) тощо.

Як бачимо, для усунення браку необхідна детальна і комплексна оцінка всього процесу лиття під тиском і аналіз конструкції оснащення.

4.2. Технологія формування порожнистих виробів із замкнутим об'ємом

Для формування виробів із замкнутим внутрішнім об'ємом (пляшки, каністри, діжки тощо) використовують методи з «нетрадиційним» пуансоном для формування внутрішньої поверхні. Це, в основному, стиснене повітря або ж відцентрова сила, яка діє на матеріал, що знаходиться у формі.

Види браку виробів, які виготовляють литтям під тиском, їх причини та способи усунення

Види браку	Причини браку	Способи усунення
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Недолив	Неправильне дозування, низька температура розтопу й форми, низький тиск лиття, неправильно вибрано поперечний переріз ливників, неправильно розміщений впускний канал, погана система вентиляції	Збільшення дози упорскування, підвищення температури розтопу, температури форми, швидкості упорскування, тиску лиття; коригування конструкції форми
Смуги та продовгуваті бульбашки на поверхні деталі	Підвищений вміст вологи в матеріалі	Підсушити сировину
Впадини (утяжини)	Низький тиск лиття, висока температура розтопу й форми, малий час витримки під тиском, недостатня доза упорскування, малий поперечний переріз ливників	Збільшити тиск лиття, температуру розтопу і форми, а також час витримки під тиском і дозу упорскування; змінити конструкцію форми і ливників
Внутрішні порожнини	Недостатній тиск лиття; малий час витримки під тиском; висока швидкість упорскування; висока в'язкість розтопу, погана система вентиляції; вологий матеріал; холодне сопло	Збільшити тиск лиття; збільшити час витримки під тиском; збільшити швидкість упорскування; підвищити температуру розтопу; змінити конструкцію форми; підсушити матеріал; змінити температуру сопла
Матова поверхня виробу	Низька температура розтопу й форми; низький тиск упорскування; недостатня доза матеріалу; зношена поверхня форми; висока адгезія матеріалу до поверхні форми	Підвищити температуру розтопу і форми; збільшити тиск упорскування; збільшити дозу матеріалу; поновити хромове покриття форми; використати антиадгезійне мастило
Сріблястість поверхні деталі	Підвищена температура розтопу і низька температура форми; підвищена вологість матеріалу; підвищена швидкість упорскування; мала площа перерізу впускних каналів; невдало вибраний час пластикації; недостатньо відполірована поверхня форми	Знизити температуру розтопу; підвищити температуру форми; підсушити матеріал; зменшити швидкість упорскування; змінити конструкцію ливників; зменшити час пластикації; відполірувати форму
Лінії стику на поверхні деталі	Низька температура розтопу й форми; низький тиск упорскування; велика усадка; низька текучість матеріалу; неправильно обрано режим вентиляції та охолодження	Підвищити температуру розтопу і форми; збільшити тиск упорскування; змінити партію матеріалу; змінити конструкцію форми
Жолоблення виробів	Неправильний температурний режим переробки; невдале розміщення впускного ливника	Збільшити час охолодження виробу; знизити температуру матеріалу і форми; використати термообробку виробів, змінити розташування впускного ливника
Великий грат (переливка) на виробі	Підвищена температура розтопу; високий тиск упорскування; недостатнє зусилля запирання форми; надто велика доза матеріалу; висока текучість матеріалу	Зменшити температуру розтопу; знизити тиск при упорскуванні; збільшити зусилля запирання; зменшити дозу матеріалу; замінити матеріал

До цих методів відносять екструзію з наступним роздуванням екструдованої заготовки (екструзійне видування), метод литтєвого видування та метод відцентрового (ротаційного) формування.

4.2.1. Метод екструзійного видування

Методом екструзії з наступним роздувом одержують різноманітну полімерну тару (пляшки, діжки, каністри, контейнери, іграшки та інші об'ємні вироби). Об'єм одержуваних цим методом виробів становить від декількох мілілітрів до 3000 л.

Екструзія – найпродуктивніший метод переробки термопластів. Це технологічний процес одержання виробів чи напівфабрикатів необхідної форми шляхом перетискання розтопу полімеру через профільюючий отвір (філь'єру). У процесі екструзії сировина переходить із твердого стану (гранули, порошок) у розтоп, а потім знову у твердий стан після виходу із філь'єри (мундштука) і охолодження. У матеріальному циліндрі екструдера (як і в литтєвій машині) розрізняють три зони: завантаження, стискання і дозування. У зону завантаження надходять тверді гранули, які з допомогою шнека стискаються в монолітний корок. Твердий матеріал перетискається спіральним каналом, який утворений поверхнями циліндра й гвинтовою нарізкою шнеку. Тертя полімеру до стінок циліндру повинно бути більшим, ніж до шнеку. Воно регулюється за рахунок забезпечення вищої чистоти поверхні шнека в порівнянні зі стінкою циліндра, а також температурою (циліндр нагрівається, а шнек охолоджується). Топлення полімеру відбувається за рахунок теплоти, що надходить від нагрівачів, а також за рахунок теплоти від внутрішнього тертя.

В зоні стиснення гранули повністю розтоплюються і за рахунок зменшення глибини нарізки шнеку розтоп стискається до утворення гомогенної маси, вільної від повітряних включень.

У зоні дозування глибина нарізки шнека не змінюється. Завдання цієї зони – нагнітати у формуючу головку розтоп при сталих значеннях температури і тиску.

Для виготовлення порожнистих виробів найчастіше використовують такі полімерні матеріали: поліолефіни, непластифікований і пластифікований полівінілхлорид, ударотривкий полістирол, АВС-пластики, полікарбонат, поліаміди, кополімери формальдегіду.

Сам процес екструзії з наступним роздуванням рукава у формі схематично представлений на рис. 4.29.

Технологічний процес відбувається в дві стадії: перша стадія – формування трубчастої заготовки; наступна – роздування у формі за допомогою стисненого повітря. На другій стадії заготовка набуває конфігурації готового виробу, який охолоджується у формі, а потім виймається з неї після розмикання.

Для виготовлення порожнистих виробів використовують екструдери з діаметром шнека 50 ÷ 90 мм. Довжина шнека не перевищує 15 ÷ 18 діаметрів, оскільки опір головки відносно невеликий, а одержаний розтоп повинен бути однорідним.

Виробництво порожнистих виробів здійснюється за допомогою спеціальних агрегатів (АВ-0,5; АВ-2,5; АВ-10; АВ-60 тощо), які містять три вузли: екструдер, головку, приймально-роздувний пристрій. Оскільки процес формування складається з двох нерівних за тривалістю стадій – відносно швидкої стадії формування трубчастої заготовки і тривалішої стадії формування та охолодження виробу – для підвищення продуктивності вибирають або багатопозиційні агрегати (з декількома формами), або з дво- і більше канальними формуючими головками (іноді з декількома мундштуками на кожному каналі). При виготовленні виробів місткістю 4 л і більше використовують акумуляторні головки з накопичувачем.

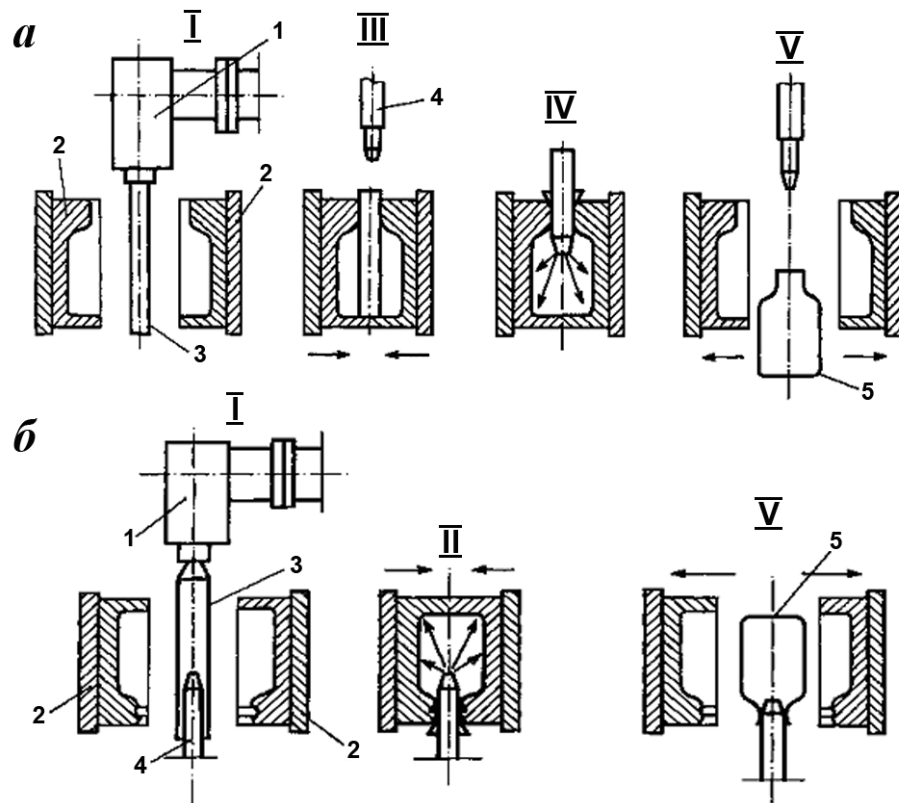


Рис. 4.29. Різновидності методу екструзійного видування:

а) подача повітря зверху; б) подача повітря знизу;

I – екструзія трубчастої заготовки; II – замикання форми, відтинання заготовки;

III, IV – роздування і витримка на охолодження; V – розмикання форми і виймання виробу;

1 – кутова екструзійна головка; 2 – рухомі півформи; 3 – трубчаста заготовка;

4 – ніпель для стисненого повітря; 5 – виріб

4.2.1.1. Вимоги до пластмас, які переробляють екструзією з наступним роздувом

Для виготовлення порожнистих виробів найчастіше використовують поліолефіни (поліетилен низької й високої густини, поліпропілен). Рідше застосовують непластифікований і пластифікований полівінілхлорид, ударотривкий полістирол, АВС-пластики, полікарбонати, поліаміди, кополімери формальдегіду тощо.

На процес екструзії з роздувом найбільше впливають питома густина та показник текучості розтопу полімеру. Збільшення густини призводить до зростання жорсткості виробів, зменшення проникності для газів і рідин. Але, для виробів на основі матеріалу з підвищеною густиною, одночасно знижується ударна стійкість.

Зі збільшенням показника текучості розтопу покращується глянець виробів, але знижується ударна стійкість, відносно подовження при розтягу й опір до розтріскування.

Підвищені вимоги до в'язкості екструдованого розтопу ставляться в зв'язку зі специфікою процесу формування.

Враховуючи те, що трубчаста заготовка екструдується з головки вниз у повітря, в'язкість повинна забезпечити її стійкість, тобто щоб заготовка не розірвалась під впливом власної ваги і не видовжувалась. Для забезпечення цієї умови виведено емпіричну залежність в'язкості від геометрії заготовки та швидкості екструзії:

$$\mu = \frac{1555 \cdot L^2 \cdot \rho}{V_e}, \quad (4.29)$$

де: μ – ефективна в'язкість розтопу; L – довжина заготовки, см; ρ – густина розтопу, г/см³; V_e – швидкість руху трубчастої заготовки на виході з екструзійної головки, см/сек.

Хоча ця залежність не враховує діаметру і товщини рукава, однак з цього рівняння виникає, що полімер з вищою густиною повинен мати більшу в'язкість для того, щоб його можна було екструдувати із такою ж швидкістю, як і матеріал з низькою густиною. І навпаки, чим нижча в'язкість, тим повинна бути вища швидкість екструзії для формування заготовки цієї ж довжини. У цілому можна стверджувати, що переробку матеріалу слід вести тоді, коли його ефективна в'язкість більша за розраховану величину.

Крім величини в'язкості до матеріалу, який переробляється екструзією з роздувом рукава ставляться й інші вимоги. Це також наявність достатньо широкого інтервалу в'язкотекучого стану (щоб зберігалась здатність до роздування), високий ступінь роздуву, здатність до зварювання під тиском і утворення міцного зварного шва.

Чим вищий ступінь кристалічності полімеру, тим прозорість виробів у більшій мірі залежить від режиму охолодження.

4.2.1.2. Технологічний процес виготовлення порожнистих виробів методом екструзійного видування

Для виробництва порожнистих виробів можна використовувати різноманітні способи формування з роздувом: екструзія трубчастої заготовки та її роздув стисненим повітрям; формування заготовки в литтєвій формі методом лиття під тиском і наступний роздув її в видувній формі; екструзія трубчастої заготовки і відливка горловини виробу, сполучення горловини із заготовкою та її роздув; нагрів раніше виготовленої екструзією трубчастої заготовки та її роздув; зварювання трубчастої заготовки з листа з наступним нагріванням і роздувом.

Найбільше поширення здобув спосіб виготовлення порожнистих виробів роздувом трубчастих екструзійних заготовок.

Технологічна схема виробництва об'ємних виробів методом екструзії з наступним роздувом складається з таких операцій: приймання сировини в контейнерах (цистернах, мішках) та транспортування її на склад; зберігання сировини; розтарювання сировини; вхідний контроль; підготовка сировини до переробки; транспортування сировини з дільниці підготовки і подавання її до бункера екструдера; формування трубчастої заготовки (топлення полімеру, гомогенізація, формування трубчастої заготовки методом вільної екструзії в повітря); підвід і змикання форми для роздуву з одночасним відтинанням труби, або відтинання труби і перенесення до приймально-роздувного пристрою; роздув у формі, витримка на охолодження, розмикання форми і виймання готового виробу; механічна обробка виробів (відтинання надлишку матеріалу на зварному шві і його зачистка); контроль якості готової продукції; пакування виробів; транспортування продукції до складу; переробка технологічних відходів – браковані вироби та відтяти залишки ґрату (переливки).

Стадія формування виробів. Для виготовлення порожнистих виробів використовуються агрегати для екструзії з наступним роздувом. Їх основні характеристики подані в табл. 4.6.

Таблиця 4.6

Технічні характеристики агрегатів для одержання порожнистих виробів методом екструзії з роздувом

Вид агрегату	Діаметр шнека, мм	Відношення L/D	Об'єм виробу, л	Габарити агрегату, м
АВ-ЗВ	63	17	до 3	1,9×1,7×3,0
„Ходос” тип 0441/P	60	20	до 6	1,9×0,8×2,2
АВГК-60	63	25	до 60	3,9×3,8×4,3
АВГК-250	90	25	до 250	5,8×5,8×5,1

Головка формує з розтопу трубчасту заготовку, яка має однорідну товщину за висотою і периметром (або ж певний характер її зміни).

Приймально-роздувний пристрій складається з декількох механізмів: ножа для відрізання ділянки трубчастої заготовки, що підлягає формуванню; механізму транспортування заготовки від головки до форми; механізму запирання форми; механізму роздуву заготовки; механізму видалення переливки; механізму виймання виробу.

Роздув заготовки може відбуватися трьома способами: через дорн, через ніпель та через порожнисту голку (рис. 4.30).

При роздуві заготовки через дорн, повітря подається через центральний отвір у ньому і дорн надає форму горловині виробу.

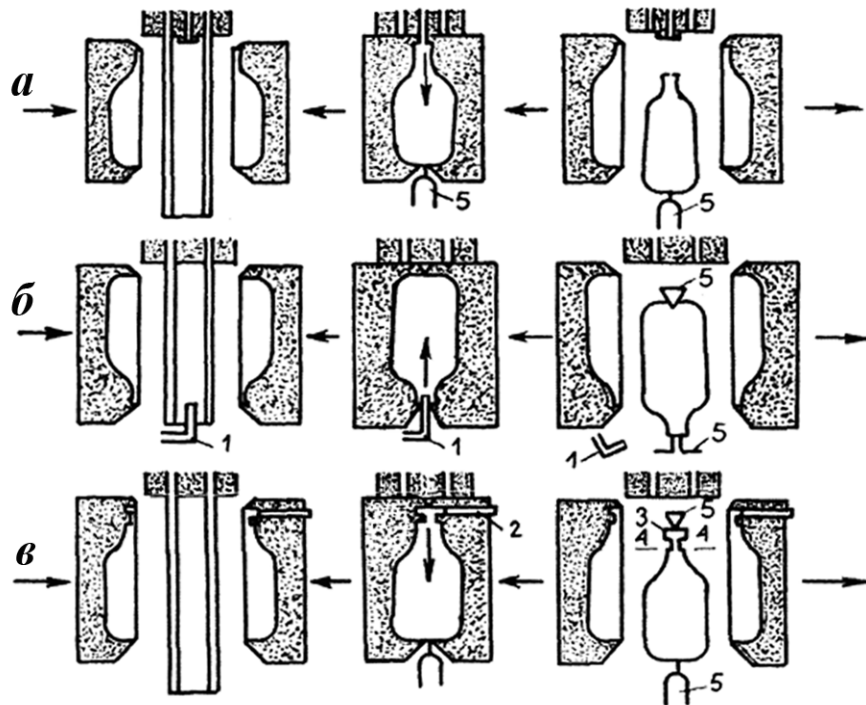


Рис. 4.30. Способи роздуву заготовки: а – через дорн; б – через ніпель; в – через голку;
1 – ніпель; 2 – отвір для введення голки; 3 – додаткова технологічна порожнина;
4 – лінія відтинання; 5 – ґрат

У випадку роздуву через ніпель трубчаста заготовка наче надягається на нього. При змиканні півформ вона обіймає ніпель, утворюючи горловину виробу. Через ніпель подається повітря. Після охолодження ніпель відводиться, а виріб дістають з форми.

Роздувом через дорн і ніпель можна формувати вироби з отворами (флакони, бутилі).

При роздуві за допомогою порожнистої голки, вона після змикання форми вводиться через отвір, проколє заготовку, і повітря подається через неї. Після роздуву голка відводиться, форма розмикається, а виріб вилучається з неї. Прокол після голки заварюється полімером.

До трубчастої заготовки підводяться півформи в розімкненому стані так, щоб вона розміщувалась симетрично до формувальних поверхонь. У момент змикання форми частина заготовки, яка виступає за габарити формувальної порожнини, зацімлюється прес-кантами по всьому периметру виробу. Під дією зусилля змикання відбувається перетискання розтопу, заготовка зварюється у вигляді замкненої порожнини, а надлишок матеріалу обрізається за контуром формувального гнізда. У момент змикання форми трубчаста заготовка відтинається від формувальної головки за допомогою ножиць або розігрітої ніхромової стрічки.

Зусилля змикання форми:

$$N = 1,2 \cdot p \cdot F_{\delta} \cdot n, \quad (4.30)$$

де: p – тиск повітря; F_{δ} – площа перетину виробу, n – гніздність.

Після змикання форми зразу ж починається формування виробу за допомогою стисненого повітря, що подається у форму способами, які наведені раніше.

Тиск повітря залежить від виду полімеру, що перероблюється, товщини стінок та розмірів виробу. Він впливає на швидкість охолодження виробу і якість його поверхні. Зростання тиску скорочує тривалість охолодження і покращує зовнішній вигляд виробу, збільшує міцність зварних швів. Найчастіше тиск роздуву складає $0,15 \div 0,5$ МПа.

Відношення діаметра виробу до діаметра заготовки називається коефіцієнтом роздуву. Він повинен бути в межах $2 \div 3,5$. При його зростанні підвищується різнотовщинність виробу за периметром. Швидкість роздуву впливає на усадку і зовнішній вигляд виробу. Збільшення швидкості роздуву зменшує усадку матеріалу і покращує якість поверхні виробу.

Процес охолодження виробу починається після притискання заготовки, яка роздувається, до стінок форми.

Час охолодження залежить від товщини стінок виробу, температури розтопу й форми, природи матеріалу. Залежно від розмірів і конфігурації виробу, природи полімерного матеріалу температура форми знаходиться в межах $20 \div 60$ °С. Збільшення температури форми покращує якість поверхні, підвищує міцність зварних швів, зменшує жолоблення й усадку виробів, але подовжує тривалість процесу охолодження. Системи охолодження, що використовуються, можна розподілити на зовнішні (охолодження стінок форми за допомогою різноманітних холодоагентів – води, розчинів солей, сумішей води з етиленгліколем) і внутрішні (внутрішнє охолодження виробу за допомогою холодного повітря, його суміші з водою; вуглекислого газу; рідкого азоту тощо).

Стадія охолодження – найтриваліший процес, тому вона є лімітуючою стадією і впливає на продуктивність виробництва.

З метою інтенсифікації цієї стадії для охолодження використовують двосторонній спосіб з подаванням розсолів у сорочку форми і переохолодженого (до -50 °С) повітря чи зріджених газів у середину виробу. Використання для охолодження зрідженого азоту скорочує тривалість стадії і підвищує якість виробу – зростає стійкість його до розтріскування.

Витримку на охолодження проводять протягом часу, при якому температура стінки виробу досягне значення $T_e \leq T_c$ для аморфних полімерів і $T_e \leq T_{\text{мартенсу}}$ для кристалічних.

Час може бути розрахований із залежності:

$$\tau_{\text{охол}} = \frac{9,2 \cdot \delta^2}{\pi^2 \cdot a} \cdot \lg \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{T_p - T_{\text{охол}}}{T_e - T_{\text{охол}}} \right), \quad (4.31)$$

де: T_p , $T_{\text{охол}}$ – відповідно температури розтопу й стінки форми; $T_{\text{охол}} = T_e - 20$ °С; T_e – температура виробу; a – коефіцієнт температуропровідності матеріалу, м/с.

Форма розкривається за допомогою вузла змикання - розмикання. Перед розкриттям форми з горловини виробу виймається ніпель, а при автоматичному режимі одночасно відриваються припливи. Вироби з розкритої форми випадають під дією власної ваги. Іноді їх дістають за допомогою стисненого повітря або виштовхувачів.

Температурний режим екструзування заготовки встановлюється залежно від природи полімеру, який перероблюється, від конструктивних особливостей обладнання і формувального інструмента, а також від конфігурації, розмірів і товщини стінки виробу (табл. 4.7).

Температурні режими формування заготовок для одержання порожнистих виробів з поліолефінів

Полімер	Температура циліндра за зонами, °С				Температура головки за зонами, °С		Тиск повітря, МПа	Місткість виробів, дм ³
	1	2	3	4	1	2		
Поліетилен низької густини	140	140	150	150	165	165	0,20 ÷ 0,25	0,5 ÷ 5,0
	120	125	130	130	130	135	0,15 ÷ 0,20	0,05 ÷ 0,5
Поліетилен високої густини	150	160	170	180	180	185	0,35 ÷ 0,40	30 ÷ 200
	140	155	165	170	170	170	0,20 ÷ 0,30	0,2 ÷ 3,0
Поліпропілен	190	200	215	215	225	235	0,30 ÷ 0,35	10 ÷ 50
	180	190	200	200	210	215	0,20 ÷ 0,30	1 ÷ 2

Підвищення температури екструзії добре впливає на зовнішній вигляд і якість поверхні виробів (покращується поверхневий глянець, знижується шорсткість), але при цьому зростає різнотовщинність стінок внаслідок витягування заготовки і подовжується цикл формування за рахунок зростання часу охолодження виробу. Перегрів також може викликати послаблення зварного шва за рахунок термоокисної деструкції матеріалу.

Знижена температура формування може бути причиною неміцного зварного шва, великої усадки й перевищеної товщини стінок виробів.

Швидкість екструзування заготовки впливає на масу і товщину стінок виробу, чистоту внутрішньої поверхні, різнотовщинність виробів і продуктивність процесу.

Збільшення швидкості екструзування заготовки призводить до збільшення товщини стінок, зниження різнотовщинності й підвищення продуктивності процесу. Але надто велика швидкість може призвести до підвищення шорсткості заготовки, утворення місцевих потоншень стінок виробу по лінії злиття потоків, а також появи на поверхні виробу частинок нерозтопленого матеріалу.

Механічна обробка виробів. На сучасних агрегатах суміщаються роздув, механічна обробка, кольоровий друк. Подрібнені і гранульовані відходи змішують з первинною сировиною в об'ємі до 30 % та повертають в цикл виготовлення виробів.

При формуванні на неавтоматизованих агрегатах механічну обробку ведуть окремо з використанням механізованих ножових чи фрезерних пристроїв.

Пакування порожнистих виробів. Пакування можна здійснювати централізовано (після дільниці контролю) і децентралізовано (біля кожного екструзійного агрегату). Вироби, які мають об'єм 1 ÷ 3 л, пакують насипом в м'які контейнери чи мішки, з об'ємом до 9 л – поштучно з формуванням пакета. Пакування виробів, які мають об'єм понад 90 л, ведеться тільки поштучно.

У випадку використання схеми, за якою відбувається заповнення ємностей рідинами, пакування доцільно проводити з використанням спеціальної касетної тари.

4.2.1.3. Переробка відходів

При виготовленні виробів з термопластів методом екструзії з роздувом утворюються зворотні і незворотні відходи. При використанні поліолефінів останні складають 1 – 2 % (втрати у вигляді газоподібних виділень, злітків при відпрацюванні режиму). Зворотні відходи (до 35 %) після дроблення, очищення і гранулювання використовують як добавку до вихідної сировини у кількості до 30 %.

4.2.1.4. Вплив технологічних параметрів одержання і роздуву трубчастої заготовки на якість порожнистих виробів

Якість замкнутих об'ємних виробів значно залежить від параметрів трубчастої заготовки (швидкості її подавання, товщини, ступеня витяжки й ефекту „розбухання”).

Заготовка, яка виходить з формувального каналу, має малу штивність, а тому витягується під дією власної ваги, що призводить до одержання різновтовщинних виробів. Для усунення цього недоліку необхідно визначити оптимальну швидкість екструзії заготовки з урахуванням її довжини, а також реологічних і теплофізичних властивостей матеріалу, який переробляється. Так, чим більші час витискання заготовки і її маса при малій в'язкості розтопу, тим більше витягується заготовка, що викликає різновтовщинність виробу (найтонша вгорі, найтовстіша – у нижній частині виробу).

Знаючи розміри виробу (зовнішній діаметр $D_{зв}$, товщину стінки $S_г$ і довжину $L_г$), можна знайти розміри трубчастої заготовки.

Для визначення довжини заготовки $L_з$ необхідно збільшити довжину виробу на 15 %, враховуючи оформлення його дна:

$$L_з = 1,15 \cdot L_г, \quad (4.32)$$

Задаючись коефіцієнтом роздуву ε_p (відношення зовнішнього розміру виробу до зовнішнього діаметра заготовки $D_{зз}$), можна знайти зовнішній діаметр заготовки:

$$D_{зз} = \frac{D_{зв}}{\varepsilon_p}, \quad (4.33)$$

Товщину стінки заготовки можна обчислити за формулою:

$$S_з = 1,2 \cdot \frac{D_{зв} - \sqrt{D_{зв}^2 - 4 \cdot \varepsilon_p^2 \cdot D_{зв} \cdot S_г + 4 \cdot \varepsilon_p^2 \cdot S_г^2}}{2 \cdot \varepsilon_p}, \quad (4.34)$$

А різновтовщинність виробу розраховують з виразу:

$$\Delta\delta_г = \frac{h \cdot K_\delta - \delta_о}{\varepsilon_p}, \quad (4.35)$$

де: h – висота щілини головки; $\delta_о$ – товщина стінки заготовки; K_δ – коефіцієнт витяжки при роздуві.

Для зменшення витягування заготовки під дією власної ваги і зниження різновтовщинності її екструзію проводять при можливій мінімально низькій температурі розтопу і високій лінійній швидкості екструзії. Мінімально можливу швидкість екструзії визначають за формулою:

$$v_e = \frac{1}{1 - [\Delta]} \cdot \frac{\rho_t \cdot L_з^2}{24 \cdot \mu_n}, \quad (4.36)$$

де: v_e – лінійна швидкість екструзійної заготовки, м/с; ρ_t – питома густина розтопу при температурі екструзії, Н/м; μ_n – найбільша (ньютонівська) в'язкість розтопу при зсуві (для ПЕНГ і ПЕВГ з показником текучості розтопу близько 2 г/10 хв вона складає відповідно $1,2 \cdot 10^5$ і $0,4 \cdot 10^6$, Па·с); $L_з$ – необхідна довжина заготовки, м; $[\Delta]$ – допустима різновтовщинність заготовки по висоті виробу (0,95 ÷ 0,98).

Розрахувавши швидкість екструзії і ступінь допустимої різновтовщинності, можна визначити необхідну продуктивність екструзійного агрегату:

$$Q = \pi \cdot \rho \cdot v_e \cdot m \cdot (R_m^2 - R_D^2), \quad (4.37)$$

де: R_m і R_D – радіуси мундштука і дорна головки.

А зовнішній діаметр щілини головки і її висота відповідно будуть рівні:

$$D_m = D_{зв} / K_{R_{cp}} \cdot \varepsilon_{cp}; \quad h = \delta_B \cdot \varepsilon_p / K_\delta, \quad (4.38)$$

де: $K_{R_{cp}}$ – ступінь розбухання по середньому радіусі труби; δ_B – товщина стінки виробу; m – кількість екструдованих струмин.

Вплив “розбухання” заготовки на якість порожнистих виробів. У процесі екструзії в потоці розтопу виникають і продовжують діяти після виходу з щілини формувального інструмента напруження, які перпендикулярні до поверхні зсуву. Це і призводить до “розбухання” екструдату (ефект Баруса або „явище еластичного відновлення”), що впливає на розміри та форму порожнистого виробу. Ефект Баруса полягає в збільшенні товщини й діаметру трубчастої заготовки і його необхідно враховувати розраховуючи розміри виробу.

На “розбухання” заготовки впливають декілька факторів: релаксація напружень в екструзійній головці і на виході з неї, перерозподіл швидкості в потоці розтопу. При переміщенні розтопу в каналі головки поперечний градієнт швидкості призводить до орієнтації макромолекул у напрямку потоку, а після виходу з екструзійної головки відбувається їх дезорієнтація, що також є причиною деформації заготовки. Вирівнювання профілю швидкостей в потоці після виходу розтопу із щілини формувального інструмента також призводить до деякого збільшення перетину заготовки незалежно від відносної довжини цього інструмента. Залежно від температури розтопу й властивостей матеріалу, який переробляється, може мати переважний вплив той, чи інший процес.

З підвищенням швидкості екструзії “розбухання” зростає, але при швидкості зсуву $\approx 20 \text{ c}^{-1}$ відбувається його стабілізація (рис. 4.31).

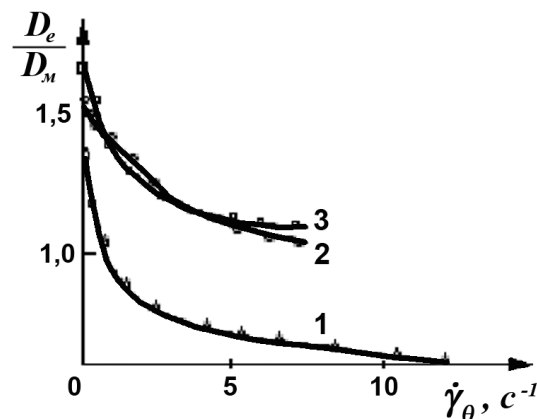


Рис. 4.31. Залежність розбухання (відношення діаметру екструдату D_e до діаметру мундштука D_m) від швидкості зсуву в тангенціальному напрямку:
1 – поліетилен низької густини, $140 \text{ }^\circ\text{C}$, $D_m = 25 \text{ мм}$; 2 – поліетилен низької густини, $140 \text{ }^\circ\text{C}$, $D_m = 10 \text{ мм}$; 3 – поліетилен високої густини, $190 \text{ }^\circ\text{C}$, $D_m = 10 \text{ мм}$

Діаметр трубчастої заготовки також змінюється залежно від довжини й конусності формувального каналу. При течії розтопу в конічних каналах, які розширюються, після виходу заготовки нормальні напруження її звужують і еластичне відновлення струмини зменшується (рис. 4.32). При виході з конічних каналів, що звужуються, діаметр заготовки збільшується (оскільки макромолекули знаходяться в стисненому стані і на виході з головки вони розпрямляються), а еластичне відновлення струмини зростає.

На “розбухання” впливає й відношення довжини каналу екструзійної головки до висоти щілини. Довжина формувального інструмента частіше дорівнює 20 висотам щілини.

Залежність між “розбуханням” і відношенням внутрішнього розміру заготовки до зовнішнього показана на рис. 4.33. Зі збільшенням цього відношення “розбухання” заготовки зменшується а при його значенні близькому до одиниці – розміри заготовки наближаються до розмірів кільцевого каналу формувального інструмента. Зі зменшенням даного відношення заготовка відчутно “розбухає” в порівнянні з розмірами кільцевого каналу

екструзійної головки. Максимальне значення “розбухання” досягається у випадку застосування суцільного прутика.

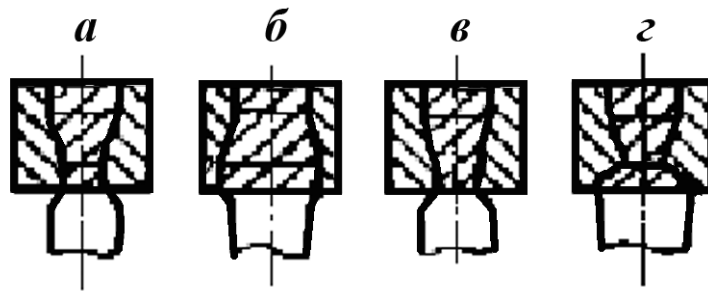


Рис. 4.32. Вплив форми каналу головки на ефект еластичного відновлення струмини
а, в – збільшення діаметру; б, г – зменшення діаметру струмини

Знаючи розміри заготовки, можна розрахувати її “розбухання”:

$$\beta = \sqrt{\beta_o^2 - \beta_o \cdot \left(\frac{D_3 - 2 \cdot S_3}{D_3} \right)^2 - 0,1 \cdot \beta_o \cdot \left(\frac{D_3 - 2 \cdot S_3}{D_3} \right)}, \quad (4.39)$$

де: β_o – коефіцієнт “розбухання” суцільного круглого прутика; D_3 – зовнішній діаметр заготовки; S_3 – товщина заготовки.

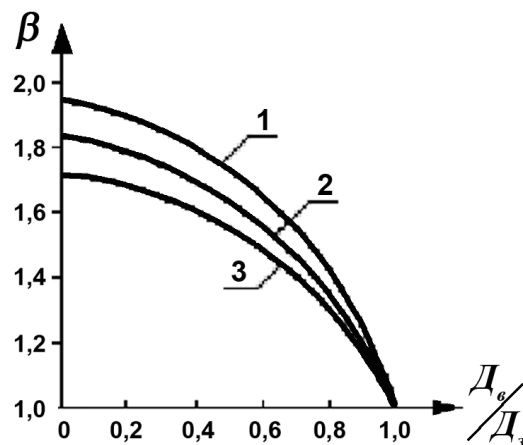


Рис. 4.33. Залежність коефіцієнта розбухання β від відношення внутрішнього діаметра трубчастої заготовки до її зовнішнього діаметра для ПЕВГ (1), ПЕНГ (2) і ПП (3)

4.2.1.5. Різновтовщинність виробів

Різновтовщинність роздувних виробів круглого перетину за висотою досягає 30 ÷ 40 %, що впливає на експлуатаційні характеристики виробів (зменшується механічна міцність, стійкість до розтріскування тощо) і на економічні показники процесу формування.

Для зменшення впливу різновтовщинності на міцність порожнистих виробів збільшують товщину стінки заготовки, що призводить до зростання витрат матеріалу і підвищення собівартості виробу (до 70 ÷ 80 % собівартості порожнистих виробів припадає на вартість сировини). Збільшення товщини стінки виробу вимагає збільшення часу охолодження його у формі, що призводить до зростання тривалості виробничого циклу, зниження продуктивності.

Для одержання рівновтовщинного виробу заготовка повинна мати різну по висоті товщину стінки, що враховує конфігурацію виробу.

Можливі два способи регулювання товщини стінки заготовки в процесі екструзії.

Перший спосіб – програмована зміна тиску в матеріальному циліндрі екструдера. Зміна товщини стінки заготовки досягається в цьому випадку за рахунок нерівномірності розбухання екструдату на виході з головки.

Більшого поширення здобув другий спосіб регулювання товщини стінки заготовки – за рахунок зміни в процесі екструзії висоти формувальної щілини внаслідок відносного зміщення конічних дорну й мундштука за певною програмою (рис. 4.34). Найпростішим варіантом цього способу є рівномірне переміщення дорну чи мундштука з одного крайнього положення в інше, а потім повернення їх у вихідне положення. При цьому товщина заготовки по висоті спочатку зростає, а потім зменшується.

Різновтовщинність виробів за поперечним перерізом з'являється при виготовленні виробів овального та прямокутного перетину з циліндричних (трубчастих) заготовок. Вона може досягати 50 %. Це викликано тим, що трубчаста заготовка при роздуванні дотикається з найближчими поверхнями формувальної порожнини, охолоджується, і роздування в цій частині форми закінчується, а шари дальніх кутів роздуваються найбільше.

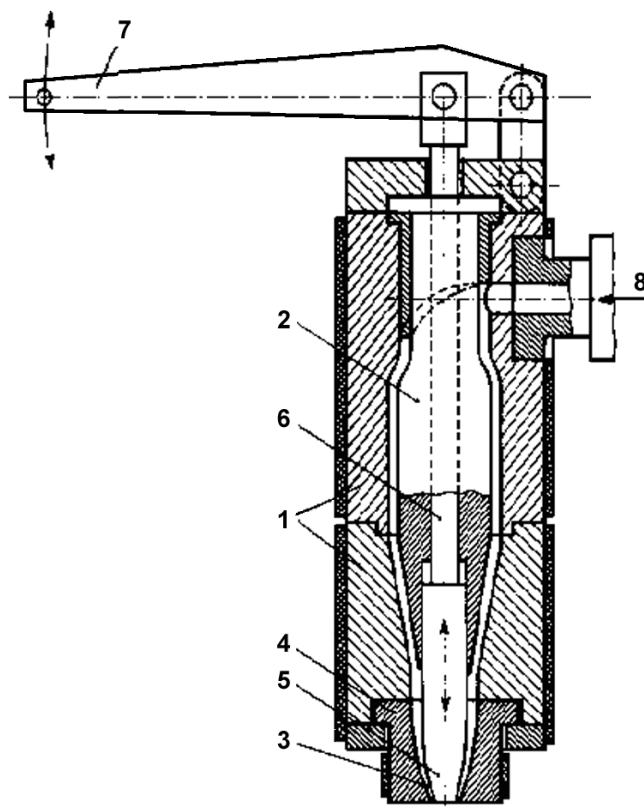


Рис. 4.34. Схема екструзійної кутової головки зі змінною висотою щілини:
 1 – корпус; 2 – дорн, який переміщується; 3 – щілина сопла; 4 – корпус сопла;
 5 – конусна кінцівка дорна; 6 – сердечник дорна;
 7 – важіль для приведення в поступальний рух дорна; 8 – напрям течії розтопу

Для усунення вказаного недоліку необхідний перерозподіл матеріалу за перерізом заготовки. Це досягають зміною конфігурації мундштука й дорну. Найбільш доцільно при виробництві об'ємних нециліндричних за перетином виробів мундштук виконувати еліптичним, а дорн – циліндричним (рис. 4.35).

4.2.1.6. Усадка виробів

Головною причиною усадки порожнистих виробів є відновлення пружних деформацій. Якщо трубчаста заготовка попередньо не витягувалась, то найбільша усадка спостерігається по діаметру.

Усадка термопласту при одержанні порожнистих виробів залежить від конфігурації і розмірів виробу, температури форми і коефіцієнта роздування. Вона складає від 1,5 до 5 %. Зі збільшенням питомої густини перероблюваного полімеру усадка зростає, що є наслідком високої кристалічності матеріалу.

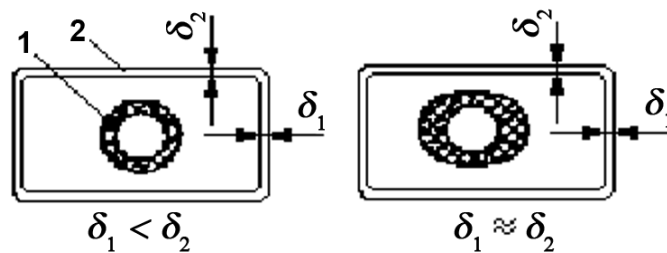


Рис. 4.35. Регулювання різнововициності еліпсністю мундштука:
1 – перетин заготовки; 2 – перетин деталі

Зростання ступеня роздування заготовки призводить до росту залишкових напружень і збільшення усадки. Для одержання порожнистих виробів з однаковою усадкою в поздовжньому і поперечному напрямках коефіцієнт роздування і ступінь витяжки в цих напрямках повинні бути рівними.

4.2.1.7. Якість поверхні виробу

Для одержання виробів з найкращим товарним виглядом необхідні умови, які збільшують тривалість циклу виробництва. Це призводить до зниження продуктивності, що не завжди доцільно.

Одним з важливих технологічних факторів, які впливають на глянець порожнистих виробів, є температура переробки полімеру. Відомо, що вироби, які одержані при високоякісному литті під тиском, мають за “блиском” їх зовнішньої поверхні 1-й клас, а вироби з матовою поверхнею – 6-й клас. Об’ємні вироби виготовляють в основному за 3-м класом. Підвищення температури переробки поліетилену на $40 \div 50 \text{ }^\circ\text{C}$ покращує блиск виробів на 1,5 класу.

Крім того, на якість поверхні впливає температура форми. З підвищенням температури форми покращується глянець виробів. На рис. 4.36. подана залежність, яка характеризує вплив коефіцієнта роздуву і температури розтопу на блиск виробу.

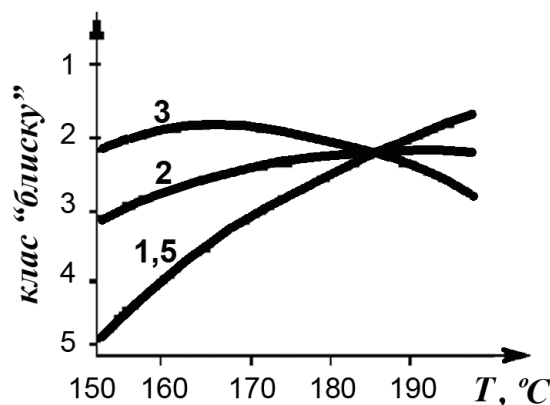


Рис.4.36. Залежність класу “блиску” порожнистих виробів від коефіцієнта роздуву (цифри біля кривих) і температури розтопу

Блиск виробу залежить також від питомої густини полімеру. Глянець виробів з полімерів високої питомої густини значно менший, ніж з матеріалів низької питомої густини.

Шорстка поверхня не придатна для нанесення друкарських написів і знижує міцність виробів внаслідок концентрації напружень. Шорсткість поверхні виникає у випадку, коли температура формувального інструмента нижча, ніж температура розтопу.

Шорсткість (смуги на поверхні) утворюється як на зовнішній поверхні виробу (сліди від мундштука, напрямком яких збігається з напрямком видування заготовки), так і на внутрішній поверхні виробу (сліди від дорну, які можуть бути напрямлені як вздовж, так і впоперек напрямку видування заготовки).

Поздовжні смуги на заготовці можна зменшити за рахунок збільшення швидкості роздування і тиску повітря, який подається на роздування трубчастої заготовки. Якість поверхні виробів підвищується при збільшенні тиску на величину до $0,5 \div 1$ МПа залежно від товщини стінки заготовки. Подальше збільшення тиску практично не впливає на якість поверхні виробів.

На якість поверхні виробу негативно впливає волога, яка може бути в повітрі, яке подається на роздув. Тому на комунікаціях повітряної системи необхідно встановлювати різноманітні пристрої для осушування повітря – теплообмінники, конденсатори, сифони, що дозволяє видалити понад 90 % вологи.

Якість поверхні виробів може погіршуватися через недостатньо ефективну роботу системи видалення повітря з простору між заготовкою і порожниною форми. Для усунення цього недоліку площини змикання півформ обробляють піскоструминним методом. Крім того, площини змикання форм фрезерують на глибину $0,8 \div 1,2$ мм або передбачають вентиляційні канали. А в глухих кутах форм свердлять отвори, які мають діаметр $0,6 \div 1,2$ мм, але не більше половини товщини стінки виробу.

4.2.1.8. Види браку при одержанні порожнистих виробів екструзією з роздувом, їх причини та шляхи усунення

У процесі виготовлення виробів методом екструзії з роздувом може виникати брак, який викликаний порушенням технологічного режиму. Найбільш поширені види браку, їх причини і способи усунення подані в таблиці 4.8.

4.2.2. Технологія формування методом литтєвого видування

Метод заснований на формуванні порожнинних об'ємних виробів з термопластів за допомогою видування у формі полімерної заготовки, попередньо одержаної литтям під тиском. Звичайно, габарити виробу, одержаного за допомогою цього способу, безпосередньо залежать від габаритів та енергосилових параметрів литтєвої машини, на якій відливається полімерна заготовка. Вироби характеризуються підвищеною точністю розмірів, вищою, ніж вироби при екструзійному видуванні, міцністю і, що найголовніше, відзначаються малою різнотовщинністю стінки.

На відміну від екструзійного видування для литтєвого видування використовується широкий асортимент термопластів без особливих вимог до реологічних властивостей. Вироби можуть виготовлятися як з одного матеріалу, так і багат шарові: (наприклад, тришарові: ПЕТ/ПА 6/ПЕТ або ж, навіть, п'ятишарові – ПБТ/ПА 6/ПЕТ/ПА 6/ПБТ), які крім міцності мають підвищену затримуючу здатність до дифузії CO_2 .

Підвищена міцність виробів (в основному тонкостінних) забезпечується двоосною орієнтацією полімеру під час роздування.

Отже весь процес формування може бути розділений на дві основні стадії: стадія лиття з одержанням заготовки (преформа) і стадія роздування преформи з остаточним

формуванням виробу. Залежно від того чи ці стадії реалізуються сумісно чи окремо існує дві різновидності методу литтєвого видування.

Перша різновидність полягає у сумісному проведенні – лиття під тиском (виготовлення заготовки) і роздування здійснюється безпосередньо на одній литтєвій машині. Для цього на ній встановлюють обертовий пристрій, на якому закріплені дві форми – литтєва і для видування (рис. 4.37).

Таблиця 4.8

**Види браку виробів, які виготовляють методом екструзії з роздувом,
їх причини та способи усунення**

Вид браку	Причини браку	Способи усунення
Недостатня товщина стінки виробу	Висока температура розтопу. Низька швидкість витиснення заготовки	Знизити температуру за зонами. Підвищити швидкість екструзії заготовки
Різновтовщинність виробу	Нерівномірний тиск по перетину формувального інструмента (головки)	Відкалібрувати кільцевий отвір головки
Потовщення зварного шва виробу	Велика швидкість змикання півформ роздувної форми. Підвищений тиск повітря, яке подається на роздув заготовки	Знизити тиск повітря
Незадовільна гомогенізація розтопу	Велика швидкість обертання шнека. Низька температура переробки	Знизити швидкість обертання шнека. Підвищити температуру за зонами циліндра й накопичувальним. Закрити подавання води на охолодження екструдера
Шорстка внутрішня поверхня	Велика швидкість видування заготовки	Знизити швидкість обертання шнека. Зменшити швидкість видування заготовки
Незадовільна зовнішня поверхня виробу	Низька температура розтопу. Низька температура форми. Низький тиск повітря для роздування	Підвищити температуру за зонами екструдера. Зменшити подавання води на охолодження форми. Збільшити тиск повітря, яке подається на роздування
При виході з формувального зазору заготовка прилипає до головки	Підвищена температура розтопу. Висока температура головки. Нагар на головці	Понизити температуру за зонами циліндра. Знизити температуру головки. Прочистити головку
Грат на бокових стінках виробу по лінії змикання форми	Підвищений тиск повітря при роздуванні. Нещільно змикаються півформи	Знизити тиск повітря, яке подається на роздув. Встановити правильно форму

Суть цього методу полягає в тому, що спочатку здійснюється цикл лиття у формі (1), пуансоном якої є перфорований сердечник, що формує внутрішню поверхню заготовки (рис. 4.38). У формі 4 в цей час формується виріб (рис. 4.37). Після упорскування чергової порції і відформування преформи стіл з формою 4 відсувається, форма розмикається і виріб видаляється. Після цього стержень 5 обертається на кут величиною π рад (180 град), форма 4 замикається і починається роздування. Одночасно стіл переміщується до литтєвої форми 3, замикаючи її, і настає черговий процес упорскування, у той час як у формі 4 охолоджується відформований виріб. Слід зауважити, що товщина стінки преформи є завжди більшою ніж стінки виробу, яка зменшується внаслідок витяжки при роздуванні.

При реалізації цього процесу велику увагу приділяють забезпеченню необхідної температури преформи (заготовки). Зрозуміло, що здійснити глибоку витяжку полімеру можна тоді, коли він знаходиться у високоеластичному чи у в'язкотекучому стані (в області, близькій до температури текучості T_m). Наявність склоподібної оболонки перешкоджатиме витягці і призводитиме до появи мікротріщин та великих внутрішніх напружень.

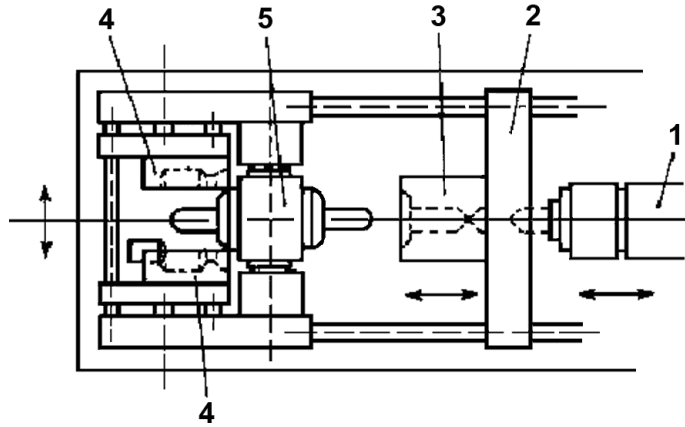


Рис. 4.37. Схема безпосереднього формування виробів методом литтєвого видування на одній машині з використанням двох форм і обертовим механізмом:
1 – пластикаційний циліндр; 2 – рухома плита машини; 3 – литтєва форма; 4 – розімкнута форма для роздування; 5 – обертовий механізм з сердечниками з перфорованого матеріалу

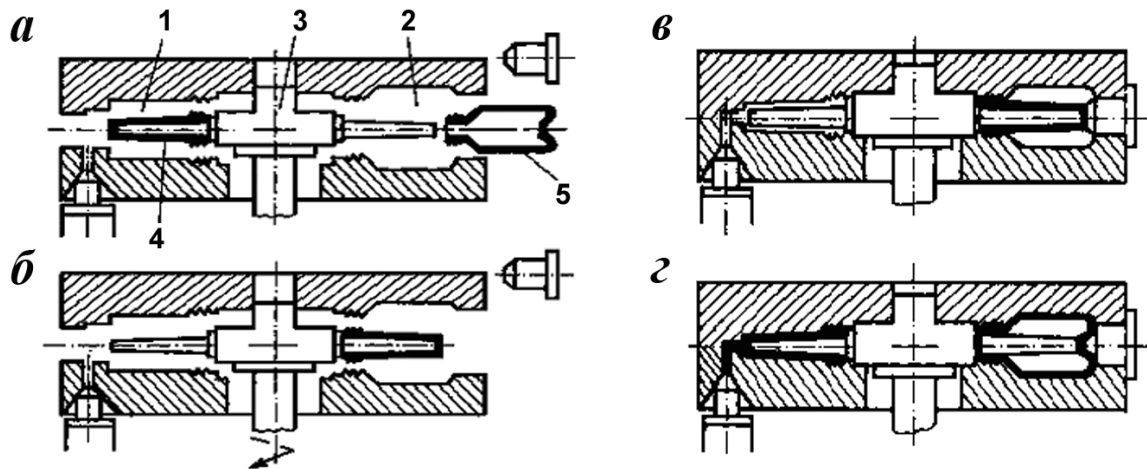


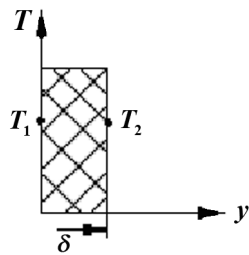
Рис. 4.38. Схема безпосереднього литтєвого видування на одній литтєвій машині з використанням суцільної спареної форми:
а) розмикання форми і знімання виробу; б) повертання вала на кут заготовки; в) змикання форми і стабілізація температури заготовки; г) роздування заготовки і формування чергової заготовки;
1 – литтєве гніздо; 2 – гніздо для роздування; 3 – вал обертовий з двома сердечниками;
4 – відлита заготовка; 5 – виріб

Тому приймається, що інтегральна (усереднена по товщині стінки) температура повинна бути близькою до температури текучості протягом усього часу до початку роздування:

$$T_m = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} T(y, \tau) dy, \quad (4.40)$$

де: $T(y, \tau)$ – температура в кожній точці за товщиною δ (див. схему) за час до роздування τ .

Треба пам'ятати, що T_1 і $T_2 > T_c$ (температури склування). Так, наприклад, при переробці непластифікованого ПВХ температура формування становить $90 \div 110$ °С.



T_1, T_2 – температури з внутрішньої і зовнішньої сторони заготовки відповідно.

Час до роздування (τ) включає витримку під тиском при литті й час на заміну форми. Для деяких полімерів (з вузьким інтервалом в'язкотекучого стану) він є більшим, ніж час перебування полімеру в цьому стані. Для такого випадку передбачають проміжне додаткове нагрівання заготовки, або ж термостабілізацію з попередньою витяжкою (рис. 4.39). У цьому випадку забезпечується більша точність і ізотропність виробу та необхідна рівнотовщинність. Ізотропність обумовлює двовісна орієнтація, яка відбувається при однаковій температурі за висотою і товщиною виробу.

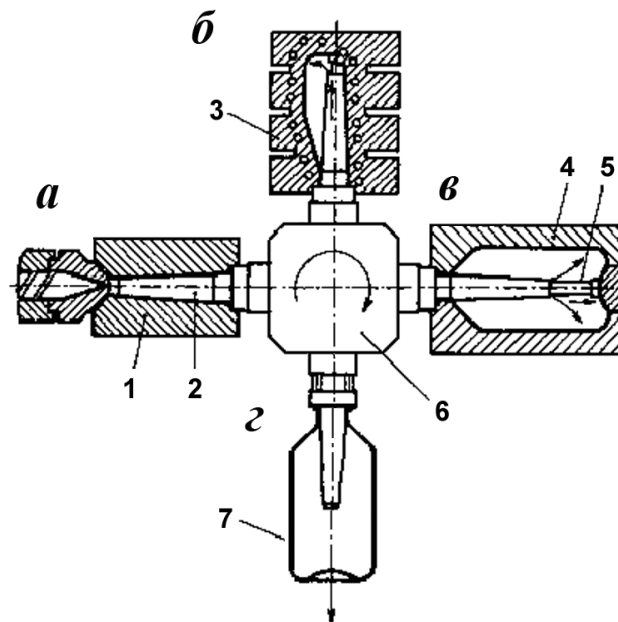


Рис. 4.39. Схема ротаційного методу литтєвого видування:

а) формування заготовки (преформи) литтям під тиском; б) попереднє роздування преформи і теплова стабілізація; в) витяжка ємності металевим стержнем (поршнем); г) охолодження і знімання виробу. 1 – литтєва форма; 2 – сердечник; 3 – форма для попередньої витяжки преформи; 4 – форма для роздування; 5 – поршень; 6 – обертливий стержень з висувними поршнями; 7 – виріб

В деяких випадках для забезпечення потрібної механічної стійкості виробу за висотою (наприклад, для ПЕТ - пляшки) встановлюють різну температуру стінки за висотою заготовки, внаслідок чого відбувається не однакова за висотою витяжка і забезпечується як різний ступінь орієнтації, так і різна товщина.

Така можливість реалізується при двостадійному методі, розділеному в часі й топографічно на дві окремі стадії: лиття під тиском з наступним формуванням виробу з преформи на іншому, відділеному зовсім від литтєвої машини устаткуванні. При такому методі відчутно збільшується продуктивність процесу та розширюється асортимент виробів, які за формою і призначенням наближені до реального споживача.

Отже, суть цього методу полягає в тому, що на першій стадії на литтєвій машині здійснюється повний цикл лиття з виготовленням преформи, яка є кінцевим виробом. Треба

зауважити, що під час лиття виконується лише три операції – пластикація сировини, упорскування і витримка під тиском.

Одержані преформи після механічної обробки (відрізання впускного, в багатьох випадках центрального ливника) пакуються і відправляються до споживача.

На другій стадії здійснюється формування об'ємних виробів за допомогою роздування преформи на спеціальному, керованому за допомогою електронних пристроїв устаткуванні, яке забезпечує виконання послідовних операцій:

- нагрівання заготовки;
- змикання форми для роздування;
- попередня механічна витяжка;
- роздування заготовки та формування виробу;
- витримка на охолодження;
- розмикання форми та видалення виробу;
- пакування виробу.

Нагрівання заготовки здійснюється за допомогою інфрачервоних променів (або електричних елементів індукційного нагріву) на пристрої, який забезпечує диференційну температуру по висоті заготовки (наприклад, найвищу у верхній частині, а найнижчу – у нижній, але при умові, що найнижча температура забезпечує умову $T_c < T_\phi \leq T_m$).

Нагріта заготовка переміщується до столу формування, на якому знаходяться форми для роздування (кількість їх така, щоби не було перерви на цикл формування: замкнута форма відводиться для виконання наступної операції, а на її місце подається чергова розімкнута форма).

При формуванні виробів, коли ступінь витяжки $K_e > 1,5$, виконується попередня механічна витяжка (після змикання форми) за допомогою нагрітого металевого пуансону. Це забезпечує рівномірність витяжки і зменшує різновшчинність виробу за рахунок вирівнювання часу до моменту дотикання матеріалу, який розтягують до холодної стінки форми. Механічну витяжку заступає остаточне роздування, яке забезпечує остаточне формування виробу. Після роздування використовується лімітуюча за часом стадія витримки на охолодження. Охолодження здійснюється за рахунок контакту з холодною стінкою форми, яка з метою інтенсифікації процесу може охолоджуватись за допомогою переохолодженого розсолу.

Час витримки на охолодження розраховують, виходячи із закону конвективного теплообміну:

$$\tau_{охол} = \frac{\delta^2}{\pi^2 \cdot a} \cdot 2,3 \lg \frac{8 \cdot (t_\phi - t_M)}{\pi^2 \cdot (t_{cp} - t_M)}, \quad (4.41)$$

де: t_ϕ , t_M – відповідно, температура формування і температура стінки форми; t_{cp} – середня температура за товщиною стінки (δ) виробу при розмиканні форми ($t_{cp} \cong t_e + 20$ °C), $t_e \leq t_{склування}$; a – коефіцієнт тепловіддачі від полімеру до стінки форми.

Інтенсифікація охолодження спостерігається також, коли для роздування використовують не повітря, а охоложену рідину (напр., воду). Рідина, яка використовується для роздування може залишитись у виробі, якщо вона є споживчою, тобто яку потрібно щільно упакувати у відформованій ємності. Такою рідиною може виступати медичний засіб, який, наприклад, пакується в поліпропіленові пляшечки визначеного об'єму. При такому методі формування рідина слугує засобом для роздування, забезпечуючи при цьому стерилізацію.

Пакування виробів, зібраних у певній кількості, здійснюється на пакувальному пристрої, оснащеному засобами контролю кількості, обмотувальними і омічним зварним пристроями.

Для пакування використовують термозбіжну поліетиленову плівку. Упаковані вироби поступають на склад готової продукції. Коли ж формування виробів здійснюється на виробничій дільниці з виробництва різних споживчих продуктів, які повинні заливатись у відформовані ємності, то лінія з формування без пакувального столу безпосередньо з'єднана з лінією розливу.

Переваги і недоліки литтєвого видування. До переваг слід віднести:

- висока точність розмірів виробів та якість їх поверхні;
- відсутність зварного шва й підвищена стійкість виробів до розтріскування;
- не потрібна механічна обробка кінцевих виробів;
- невелика різновтовщинність виробів;
- висока продуктивність процесу (при роздільному способі формування).

Недоліки методу:

- великі амортизаційні відрахування на оснащення (дороговартісне оснащення);
- обмежений об'єм виробів (до 10 л);
- неможливість одержати вироби без горловини: розмір горловини визначається розміром сердечника пуансона при литті.

4.2.2.1. Литтєве пневмовакуумформування

Суміщення лиття під тиском термопластів і термоформування об'ємних виробів з листа термопласту дозволяє використати для формування листову заготовку з неоднаковою товщиною в перероблюваній площині. При звичайному термоформуванні з листа неможливо рівномірно нагріти різновтовщинний лист. При литті під тиском можна забезпечити рівномірне охолодження розтопу, упорснутото у форму за рахунок відповідної конструкції форми і певного температурного режиму охолодження. Тому існує можливість об'єднати процес формування листової заготовки і виготовлення з неї об'ємного виробу методом термоформування, використовуючи одне устаткування, яке складається з литтєвої машини з формою на лист і формувальної приставки для термоформування. Внаслідок такого поєднання можна формувати вироби з листової заготовки, частково охолодженої після лиття до температури високоеластичного стану. Принципова схема роботи такого устаткування зображена на рис. 4.40.

Поміж півформами 1, які закріплені до плит литтєвої машини, вставляється зімкнута затискна рама 2. По зовнішньому периметрі піврам виконана проточка, яка створює порожнини для формування утримуючого периферійного канту на відформованій заготовці.

Процес формування складається з двох стадій – формування заготовки методом лиття під тиском і наступне пневмо- або ж вакуум-формування об'ємного виробу на вмонтованій приставці.

Лиття під тиском здійснюється після підведення сопла до зімкнутої форми (рис. 4.40, а). Після упорскування розтопу проводиться витримка під тиском і охолодження заготовки до встановленої температури високоеластичного стану полімеру. Після цього литтєва форма розмикається і затискна рама разом з відформованою заготовкою переміщається на позицію формування (рис. 4.40, б). Здійснюється змикання пристрою формування, який складається з матриці 3 і, у випадку формування глибоких виробів, пуансону 5. Внаслідок переміщення пуансону по спрямовуючих 6 відбувається попередня механічна витяжка листа. Після її закінчення в матриці створюється розрідження і формування завершується з наступним охолодженням. Формувальний пристрій після завершення циклу формування розкривається, розводяться матриці і пуансон (рис. 4.40, в).

На цій стадії здійснюється розкриття затискної рами, виштовхування виробу за допомогою виштовхувача 4 і змикання литвевої форми. Потім цикл повторюється. Кант на заготовці забезпечує надійне її кріплення в затискній рамі при вакуумформуванні. Конфігурацію канта передбачають таку, щоби вона була відповідним елементом готового виробу 7.

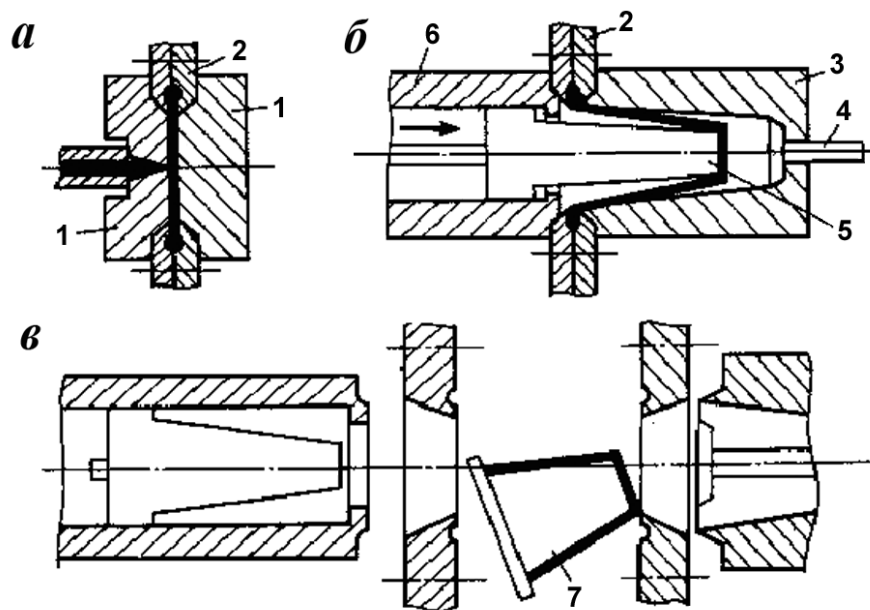


Рис. 4.40. Схема термоформування на литтєвій машині з формувальною приставкою: а – лиття заготовки; б – формування виробу; в – знімання виробу

При виробництві виробів з невеликою глибиною пуансон (механічний плунжер) може бути відсутній. При формуванні товстостінних виробів замість вакууму використовують тиск повітря (пневмоформування).

4.2.3 Технологія ротаційного формування виробів

Метод ротаційного формування ґрунтується на оформлюванні внутрішньої поверхні виробу за рахунок відцентрованої сили, тобто полягає у рівномірному розподіленні сировини по поверхні форми при її обертанні у двох (вертикальній та горизонтальній) чи одній площинах. Таким методом виготовляють об'ємні, асиметричні порожнинні вироби об'ємом від 0,3 до 10 м³ і, навіть, як свідчать дані фірми Касіно (Італія), до 45 м³. Стінки виробів відзначаються рівнотовщинністю з малим ступенем напруженості, але не зовсім гладкою внутрішньою поверхнею.

Принцип ротаційного формування полягає у тому, що віддозовану порцію матеріалу завантажують у порожнисту металеву форму, виготовлену з листового металу, котру герметично замикають і за допомогою приводного механізму приводять у обертний рух у двох взаємно-перпендикулярних площинах (рідше використовується обертання в одній площині) (рис. 4.41).

Форму, яка обертається, поміщують у нагрівний пристрій (піч, калорифер з гарячим повітрям чи полум'ям, інфрачервоний колектор), або ж подають теплоагент у нагрівну сорочку (при її наявності). Як теплоагент може бути використаний легкоотопкий стоп лужних металів. При дії температури та обертання розтоп матеріалу щільно прилягає до внутрішніх стінок форми, змащених антиадгезивом, ущільнюється і формується виріб, конфігурація зовнішньої поверхні котрого відтворює конфігурацію поверхні форми. Після чого форма при обертанні охолоджується обдуванням повітрям або рідким холодоагентами, які можуть подаватись в зовнішню сорочку. Охолоджена до встановленої температури форма

зупиняється, розмикається і виріб виймають. Він легко відстає за рахунок переважно однонаправленої збіжності (усадки) – до середини (протилежно до напрямку дії відцентрової сили). Форма повинна мати малу масу, тому її виготовляють з легких металів, таких як алюміній та його стопи, рідше – з тонкої листової сталі.

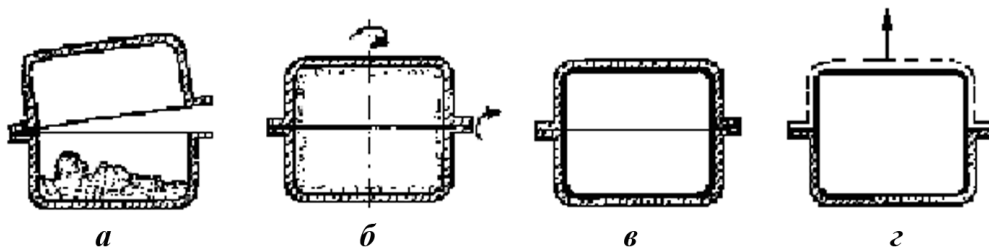


Рис. 4.41. Постадійна схема ротаційного формування

Установка для ротаційного формування може бути одногніздною або багатогніздною (коли на одному редукторі розміщено декілька форм) – це залежить від об'єму виробу й необхідної продуктивності. При багатогніздній установці її продуктивність може складати 500 виробів за годину.

Аналіз методу ротаційного формування свідчить, що ним можна переробляти, практично, будь-яку сировину, котра переходить у в'язкотекучій стан (топиться) чи є рідиною або ж пастою (пластизолі). Отже, для переробки використовують порошки термопластів (ПЕ, ПВХ, ПА, ПС, АБС тощо) і реактопластів, термореактивні олігомери й, навіть, мономерні композиції з ініціаторами чи каталізаторами полімеризації.

Треба зауважити, що на якість виробу і продуктивність процесу, окрім температурного режиму і типу сировини, великий вплив має її гранулометричний склад (коли використовуються порошки, гранули) – розмір гранул і полідисперсність. Як правило, для ротаційного формування використовують порошки з розміром частинок $50 \div 200$ мкм.

Методом ротаційного формування можна виготовляти вироби із сировини одного типу – моношарові вироби, а також – багатошарові, коли використовується різнотипна сировина (суміш полімерів, чи полімерів і олігомерів, які суттєво відрізняються значеннями температури текучості). При формуванні виробів із суміші полімерів потрібно пам'ятати, що вихідні полімери повинні мати близькі значення збіжності і температурного коефіцієнта розширення, а температура топлення одного не повинна перевищувати температуру деструкції другого. Треба зауважити, що деструктивні процеси при ротаційному формуванні можуть мати відчутний вплив тому, що процес формування відзначається великою тривалістю й, щоби зменшити час циклу, розтоплювання ведуть при температурах значно вищих, ніж температура текучості (топлення). Дуже висока температура стінки може спричинити приповерхневу деструкцію полімеру й призвести до погіршення якості виробу. Саме цим обумовлена потреба використання додаткових термостабілізаторів і, в багатьох випадках, заповнення порожнини форми інертним газом. Отже, переробка термопластів супроводжується лише фізичними процесами – топлення матеріалу, деформація і можлива орієнтація у напрямку дії сили, застигання (перехід у склоподібний стан) та збігання (усадка виробу). Хімічний процес деструкції – небажаний. При переробці реактопластів, олігомерів чи мономерів окрім фізичних процесів відбуваються і хімічні реакції затвердження чи полімеризації.

При охолодженні розтопу або ж затвердженого матеріалу спостерігається збігання (усадка), котра закономірно буде зростати зі збільшенням товщини стінки виробу. Усадку необхідно врахувати при розрахунку геометричних розмірів форми. Зменшити збігання виробу можна, збільшуючи оберти форми (високообертний метод), але в цьому випадку в

матеріалі розвивається значний тиск, який викликає орієнтацію полімеру в напрямку дії відцентрової сили, що призводить до анізотропії міцності виробів.

Як правило, швидкість обертання залежить від типу сировини і габаритів виробу і лежить в межах $150 \div 1500$ м/хв (наведена в табл. 4.9). Зі збільшенням габаритів швидкість зменшується. Швидкість обертання форм навколо горизонтальної осі визначають за формулою:

$$n = \frac{V_{окр}}{\pi \cdot D}, \quad (4.42)$$

де $V_{окр}$ – окружна швидкість, яка залежить від типу сировини (табл. 4.9); D – внутрішній діаметр виробу, м.

При обертанні форми навколо вертикальної осі внутрішня поверхня приймає форму параболоїду обертання (рис. 4.42 б), тому товщина стінки цієї фігури у верхній і нижній частині відрізняється на величину $(d_в - d_н)/2$ ($d_в$, $d_н$ – верхній і нижній діаметр). Отже різновтовщинність буде залежати від швидкості обертання (n) і висоти виробу (H):

$$n = 600 \sqrt{\frac{H}{d_в^2 - d_н^2}}, \quad (4.43)$$

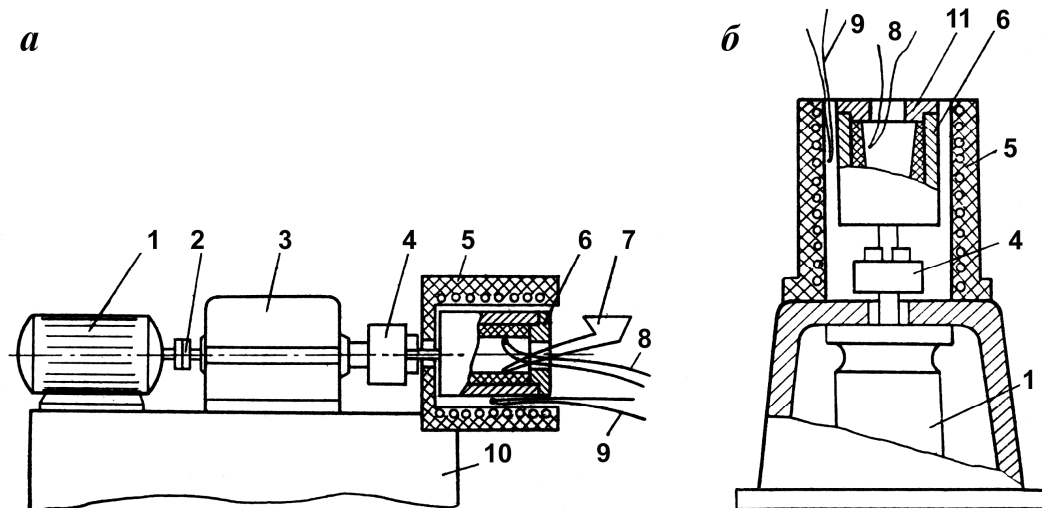


Рис. 4.42. Конструкція установки з горизонтальною (а) і вертикальною (б) осями обертання: 1 – двигун постійного струму; 2 – муфта; 3 – вузол підшипників; 4 – патрон; 5 – термокамера; 6 – форма; 7 – лоток для заливки компаунда; 8 – терморпара контрольна; 9 – терморпара – датчик терморегулятора; 10 – станина установки; 11 – кришка форми

Загалом, швидкість обертання навколо вертикальної осі є меншою, ніж навколо горизонтальної (орієнтовні величини $n_{верт} = 2 \div 5$ об/с, $n_{гориз} = 10 \div 15$ об/с).

Швидкість обертання повинна переважати деяку критичну величину $n_{кр}$, при якій рідка полімерна (чи мономерна) маса приводиться в рух разом зі стінкою форми. Для розтопів, а також для олігомерних компаундів, для котрих значення густин близьке до одиниці, $n_{кр}$ визначається із залежності:

$$n_{кр} = \frac{200}{\sqrt{R - S}}, \quad (4.44)$$

де: R – зовнішній радіус деталі, см; S – товщина стінки виробу, см.

Монолітність матеріалу та міцність виробу залежать від створеного відцентровою силою тиску, який сприяє ущільненню матеріалу. Цей тиск може бути визначений із залежності:

$$p = \frac{2\pi^2 \cdot n^2}{g} \cdot \rho \cdot (R_i^2 - r^2), \quad (4.45)$$

де: g – прискорення вільного падіння, $\text{см}^2/\text{хв}$; ρ – питома густина матеріалу при температурі формування, $\text{г}/\text{см}^3$; R_i – зовнішній радіус рідкого шару, см ; r – внутрішній радіус рідкого шару, см .

Окрім швидкості обертання форми режим ротаційного формування складають ще такі параметри: температура формування, час формування, температура холодоагенту й час охолодження.

Температура формування залежить від типу сировини і впливає на продуктивність процесу та якість виробу. При підвищенні температури зростає швидкість нагрівання форми та нагрівання сировини до в'язкотекучого стану при переробці термопластів. А при переробці реактопластів та мономерних композицій ця температура визначає швидкість реакції затвердження і впливає на швидкість нагрівання маси до температури високої активності. Орієнтовані значення температури приведені в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9

Значення оптимальних швидкостей обертання форми навколо горизонтальної осі для різних матеріалів

Матеріал	Температура формування, °С	$V_{\text{окр}}$, м/хв
Капролон	170	600
АСТ – Т	20	600
Поліетилен	250	150
Поліамід	270	600
ЕД - 5, ПН – 1 (ненаповнені)	80 і 120	125 – 200
ЕД - 5, ПН – 1 (з волокнистим наповнювачем)	80 і 120	1500

Час формування залежить від типу сировини, температури форми, товщини стінки виробу, а при переробці реактопластів, олігомерів і мономерів – ще й від реакційної здатності сировини.

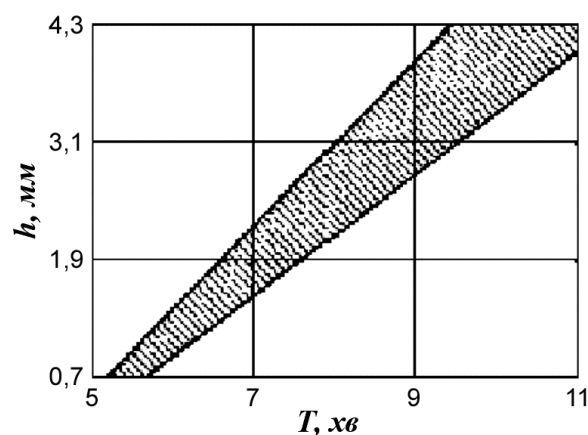


Рис. 4.43. Залежність товщини стінки (h) смкості з ПЕНГ від часу (T) нагрівання під час ротаційного формування; нагрівання форми здійснюється в камері гарячим повітрям

Відчутний вплив на якість виробу й продуктивність процесу має температура і швидкість охолодження. Надто низька температура холодоагенту (швидке охолодження) може призвести до виникнення у виробі значної концентрації внутрішніх напружень через нерівномірність охолодження по товщині внаслідок низької теплопровідності полімерного матеріалу. Внутрішні напруження можуть викликати появу мікротріщин, розтріскування чи

жолоблення виробу, тому охолодження ведуть повільно, щоби забезпечити максимально перебіг необхідних реакційних процесів у матеріалі. Отже, стадія охолодження найбільш тривала й одна з найвідповідальніших стадій процесу.

У цілому, технологічний процес ротаційного формування складається з наступних стадій:

- підготовка форми (зачищення, антиадгезивна обробка внутрішньої поверхні);
- підготовка сировини (можливе змішування, просіювання, сушіння, розчинення тощо);
- завантаження сировини у форму;
- замикання форми;
- запуск приводу обертання;
- нагрівання форми, що обертається, до повного топлення матеріалу чи полімеризації;
- охолодження рухомої форми;
- розмикання форми і знімання виробу;
- термовідпал виробу (термонормалізація) – здійснюється за вимогами технології.

Одноосьове відцентрове формування використовують для формування виробів обертової форми з термопластів чи реактопластів – труби, втулки тощо. Таким методом можуть бути виготовленні труби діаметром до 3 м і товщиною стінки до 40 мм з наповнених композицій, які містять до 45 % наповнювача (порошковий кварц, каолін чи дроблене волокно). При такому методі формуючий елемент може обертатись навколо горизонтальної осі з підвищеною кутовою швидкістю до 45 с^{-1} .

Переваги і можливості ротаційного формування:

- одержання малонапружених виробів великих об'ємів без повітряних включень у стінках;
- можливість формування багатошарових виробів з декількох матеріалів, які не змінюються;
- можливість модифікації і фарбування під час формування;
- можливість формування з мономерів (наприклад, з капролактаму);
- дешевизна методу – малі затрати енергії й низька вартість форми.

Недоліки методу:

- труднощі у встановленні стабільного і рівномірного температурного режиму формування (це важливо для кристалічних полімерів);
- довготривалий процес охолодження й, тому, невисока продуктивність процесу.

4.3. Технологія формування виробів з листових матеріалів. Термоформування

Метод термоформування об'єднує такі способи виготовлення виробів: пневмо-, вакуум-формування, штампування, вільне видування. В основу методу покладений один і той же спосіб переробки: полімерний лист з термопластичного полімеру, нагрітий до температури розм'якшення (до області високої сегментної рухливості: високоеластичний стан), витягують у формі за допомогою тиску повітря чи механічного зусилля пресу, або під дією розрідження. При цьому лист набуває необхідної конфігурації, притискаючись до поверхні форми й, охолоджуючись, фіксує цю конфігурацію.

Для формування використовують полімери, які мають явно виражену область високоеластичного стану. До таких полімерів, у першу чергу, належить більшість аморфних полімерів (рис. 4.44).

Висококристалічні полімери (наприклад, поліетилентерефталат) практично не перероблюються таким методом через відсутність високоеластичного стану й низьку в'язкість розтопу.

Методом термоформування виготовляють об'ємні вироби з відкритим вільним об'ємом різної конфігурації й, особливо, великогабаритні: ванни, панелі холодильників, пакувальна тара з тонкими стінками, авіафурнітура тощо.

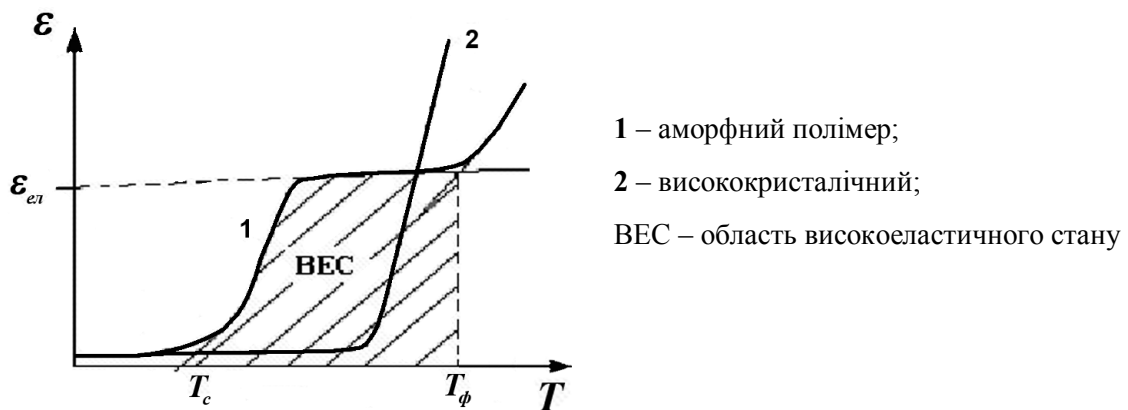


Рис. 4.44. Термомеханічні криві полімерів

Метод економічно вигідно застосовувати для виготовлення дрібносерійних партій виробів внаслідок дешевизни оснащення і малих енерговитрат при роботі на нескладному обладнанні.

4.3.1. Фізико-хімічні основи процесу

На відміну від лиття під тиском чи екструзії, при термоформуванні з листів відсутня течія розтопу під дією високого тиску з виникненням напружень зсуву. Формування здійснюється за рахунок витяжки листа у високоеластичному стані чи при температурі, яка незначно перевищує температуру текучості (T_m). У даному випадку діючими є нормальні напруження, які викликають великі деформації розтягу, що супроводжуються спрямленням макромолекул і їх орієнтацією в напрямку витяжки.

До хімічних процесів (до речі, небажаних) можна віднести деструктивні процеси, викликані в першу чергу нормальними напруженнями (механодеструкція), які, як відомо, зростають при пониженій температурі деформування, та термоокисну деструкцію, яка може виникнути при нагріванні листа.

Формування виробів з листових матеріалів включає нагрів заготовки з листового термопласту до температури, що відповідає високоеластичному стану полімеру (при переробці аморфних термопластів), чи до температури початку топлення кристалітів (при переробці частково кристалічних термопластів), закріпленні її в затискачах, що встановлені над формою, і формуванні у виріб за рахунок різниці тиску над вільною поверхнею заготовки і в порожнині, що утворена заготовкою й формувальною поверхнею форми (перепад тиску можна створити вакуумуванням порожнини форми, або ж створенням надлишкового тиску над заготовкою, – пневматичного, гідравлічного чи механічного).

Іноді формування виробів з листових термопластів здійснюють без попереднього підігрівання, або з незначним підігрівом (на $20 \div 40$ °С нижче температури склування). Цей метод виготовлення виробів називається холодним формуванням. Для формування виробів використовують механічне витягування; процес відбувається з високою швидкістю. При цьому за рахунок перетворення механічної енергії в теплову відбувається частковий розігрів заготовки, котра формується. Такий метод не може використовуватися для одержання виробів з крихких полімерів.

Термоформування – метод формування виробів з листових термопластів з попереднім підігрівом. Він одержав більше поширення в промисловості, ніж холодне формування.

Формування виробів з листових термопластів супроводжується орієнтацією полімеру. При деформації в ньому виникають залишкові напруження, що обумовлені зворотністю високоеластичної деформації. Орієнтований полімерний матеріал поводить себе, як жорстка нерівноважна система, яка намагається скоротитися.

Крім орієнтаційних напружень, термічні напруження, які виникають при охолодженні матеріалу, а також напруження від зовнішнього механічного впливу можуть бути розтягуючими. Ці напруження виникають практично у всіх виробках, які одержують методом вакуум-формування, і призводять до розтріскування виробів.

Найбільш важливою властивістю листового термопластичного матеріалу, який придатний для термоформування, є його здатність до значного подовження без розриву. Ця властивість залежить від температури.

Методом термоформування можна одержати виріб з листа, перевівши матеріал зі склоподібного у високоеластичний стан. Для кожного полімеру існує оптимальний температурний інтервал термоформування. Наприклад, для полістиролу мінімальна (T_{min}) і максимально допустима (T_{max}) температури формування визначаються за формулами:

$$T_{min} = T_c + 20^\circ\text{C}, \quad T_{max} = T_m - 5^\circ\text{C}, \quad (4.46)$$

4.3.2. Вимоги до матеріалів та заготовки

Для термоформування використовують полімери, для яких властива широка область ВЕС з достатньо великою ε_{el} (див. рис. 4.36, крива 1) або полого залежність в'язкості розтопу від температури при низькій текучості останнього. Вузкий інтервал ВЕС викликає труднощі при формуванні внаслідок необхідності дотримання точного температурного режиму нагріву листа, при цьому зростає ймовірність браку через високу можливість фіксації внутрішніх напружень від малого температурного запасу руху макромолекул і швидкого затвердіння полімеру. Малий температурний запас запобігає протіканню релаксації нормальних напружень, а також може спостерігатись утворення мікротріщин у цих місцях.

Крім того, до листових заготовок ставляться такі вимоги:

1. лист повинен бути однорідним в всьому об'ємі;
2. різновтовщинність листових заготовок не повинна перевищувати 10 % по відношенню до номінальної;
3. інтервал температур формування має бути досить широким;
4. матеріал у нагрітому стані повинен бути високоеластичним і характеризуватися, великим значенням деформації (для глибокої витяжки);
5. в'язкість розтопу матеріалів має забезпечувати можливість нагрівання заготовки в закріпленій рамі без провисання;
6. термічна усадка листа повинна бути мінімальною й не перевищувати 5 %;
7. матеріал повинен забезпечити формостійкість виробу під час експлуатації.

До найбільш вживаних вихідних матеріалів належать полімери: полістирол, ко-полімер стиролу з акрилонітрилом або каучуком (ударотривкий ПС), АВС-пластики, ПВХ (непластифікований і пластикат), поліметилметакрилат і його кополімери та гомологи, поліетилен високої густини, поліпропілен, полікарбонати, пентапласт, пінолисти з ПС, АВС, ПВХ.

Закономірності технології термоформування розглянемо на прикладі пневмоформування, як найбільш поширеному.

4.3.3. Характерні особливості технології пневмоформування

Залежно від виду формування і використовуваного оснащення технологічний процес пневмоформування може дещо видозмінюватись, але основні стадії його зберігаються (рис. 4.45):

1. Підготовка листової заготовки (вирубка за розмірами, зачищення поверхні);
2. Закріплення листової заготовки в рамі;
3. Нагрівання листа;
4. Попередня витяжка нагрітим пуансоном (штоком) (може не здійснюватись);
5. Формування виробу (стисненим повітрям чи з допомогою розрідження);
6. Витримка на охолодження;
7. Знімання рами з півфабрикатом, витинання й зняття виробу.

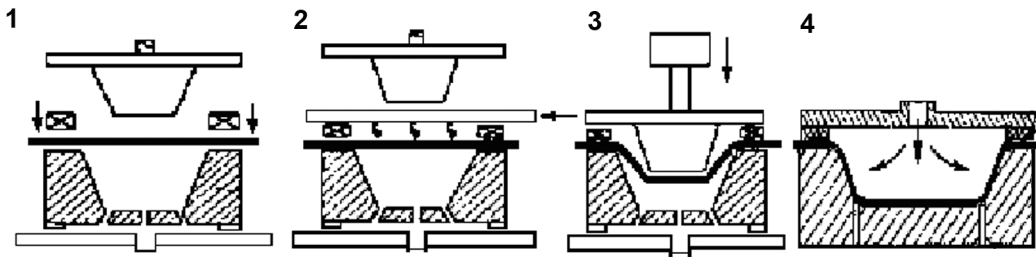


Рис. 4.45. Схема технологічного процесу пневмоформування

Закріплення заготовки в рамі здійснюється переважно автоматично при допомозі ексцентрикових чи кулачкових затискачів. Зусилля притискання повинне забезпечити надійне утримування листа при витяжці з напруженням σ_T :

$$g_0 \cdot f \cdot s \cdot \phi = \sigma_T \cdot \delta \cdot \phi, \quad (4.47)$$

де: ϕ – параметр рами; s – ширина захоплення листа; f – коефіцієнт тертя полімеру до матеріалу рами; g_0 – питоме зусилля притискання; σ_T – напруження витяжки листа; δ – товщина листа.

Значення $g_0 \cdot s \cdot \phi$ є не що інше, як N_s (зусилля притискання). Отже

$$N_s \cdot f = \sigma_T \cdot \delta \cdot \phi, \quad (4.48)$$

звідси:

$$N_s = \frac{\sigma_T \cdot \delta \cdot \phi}{f}, \quad (4.49)$$

Нагрів листа здійснюється різними шляхами:

- а) в електропечах (окремо від місця формування);
- б) струмами високої частоти;
- в) інфрачервоними (ІЧ) нагрівачами (над формою).

Нагрівання – найтриваліша стадія, яка визначає продуктивність процесу і становить 50 – 80 % усього циклу формування. Тривалість нагрівання листа (τ_n) перед формуванням розраховують за формулою (при умові конвективної теплопередачі):

$$\tau_n = \frac{\delta^2 \cdot F_0}{4a}, \quad (4.50)$$

де: F_0 – критерій Фур'є; a – коефіцієнт температуропровідності термопласту, м²/год.

Критерій Фур'є визначається з температурного фактору (градієнта температур нагрівника і листа):

$$\theta = \frac{t_c - t_\phi}{t_c - t_0}, \quad (4.51)$$

де: t_c , t_ϕ , t_0 – відповідно температура стінки нагрівача, оптимальна температура формування і початкова температура листа.

Існує графічна залежність F_0 від θ (рис. 4.46)

У виробничих умовах найчастіше температуру листа не вимірюють, а визначають час нагріву, який залежить від теплоємності і теплопровідності матеріалу, товщини листа і інтенсивності нагріву. У випадку ІЧ нагріву час розраховують із залежності:

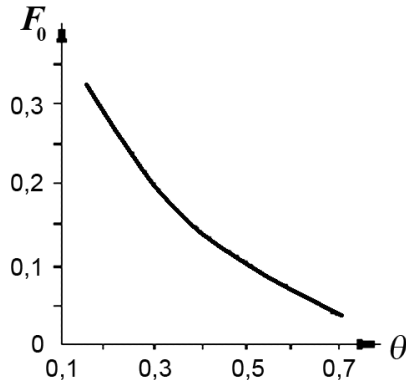


Рис. 4.46. Залежність критерію Фур'є від температурного градієнту θ

$$\tau_n = \frac{c_p \cdot \rho \cdot \delta^2 \cdot (T_\phi - T_0)}{h \cdot \Delta T}, \quad (4.523)$$

де: ΔT – температурний градієнт між температурою верхньої й нижньої поверхонь листа.

$$\Delta T = T_\phi - T_n, \quad (4.53)$$

T_ϕ – середня температура формування, що встановлюється після нагріву:

$$T_c \leq T_\phi = (T_\phi + T_n) / T_0 \leq T_m (T_{nl}), \quad (4.54)$$

T_0 – початкова (кімнатна) температура листа.

Зрозуміло, що час досягнення необхідної T_ϕ залежить від ΔT , який повинен бути максимальним для зменшення часу нагріву. Зростання ΔT обмежується термостійкістю полімеру: поверхня зі сторони нагріву може нагріватись не вище температури, яка близька до температури деструкції (T_δ). Тому інтенсивність нагріву вибирається завжди, виходячи з умови:

$$\Delta T \leq T_\delta - T_c, \quad (4.55)$$

де: T_c – температура склування.

Середня температура формування (T_ϕ) впливає на сам процес формування і на міцність та термозбіжність виробу. При низькій T_ϕ формування виробів складної конструкції утруднюється і потребує значно більшого тиску (розрідження) формування. Чим вища T_ϕ , тим менша термозбіжність, але нижча міцність на розрив в усіх напрямках (отже, виріб більш ізотропний). Одночасно, підвищення температури до T_m призводить до збільшення витяжки і зменшення тиску формування. Температура формування обмежується температурою, при якій спостерігається провисання, яке, зрозуміло, більш відчутне при більшій товщині листа і його периметрі. Початок провисання можна визначити з рівності:

$$\pi R^2 \cdot \delta \cdot \rho = 2\pi R \cdot \delta \cdot \sigma'_m, \quad (4.56)$$

де: R – радіус рами; σ'_m – межа текучості розтопу. Лист не провисає, коли зберігається нерівність:

$$\sigma'_m \geq \rho \cdot R / 2, \quad (4.57)$$

Формування виробу відбувається внаслідок витяжки листа під дією тиску повітря (пневмоформування), розрідження (вакуум-формування) чи зусилля пресу (штамбування) і притискання його до поверхні форми потрібної конфігурації.

При формуванні важливою характеристикою є швидкість витяжки. Вона повинна бути такою, щоб ланки макромолекул (сегменти) при деформації перегрупувались, але не руйнувались. Максимальна швидкість досягається при певній температурі T_ϕ , при якій забезпечується мінімальна різнотовщинність і відчутна орієнтація макромолекул. При зменшенні швидкості формування знижується орієнтація, оскільки відбувається часткова релаксація орієнтаційних напружень. Швидкість витяжки визначається тиском формування, який у свою чергу залежить від багатьох факторів. Зниження температури листа, ускладнення форми виробу і збільшення глибини (висоти) виробу призводить до зростання тиску формування.

Швидкість витяжки, як правило, знаходиться в межах $150 \div 200$ мм/с. Тоді час (тривалість) формування визначається за формулою:

$$\tau_\phi = \frac{H}{v_\phi}, \text{ [с]}, \quad (4.58)$$

де: H – максимальна глибина витяжки, яка рівна глибині формотворної поверхні матриці.

Процес формування оцінюють коефіцієнтом витяжки, який залежить від глибини і конфігурації виробу. Його розраховують:

$$K_e = \sqrt{\delta_0/\delta_e} - 1, \quad (4.59)$$

де: δ_0 – початкова товщина листа; δ_e – товщина стінки виробу.

Коефіцієнт витяжки впливає на орієнтацію макромолекул (прямо пропорційно) і міцність виробу (рис. 4.47).

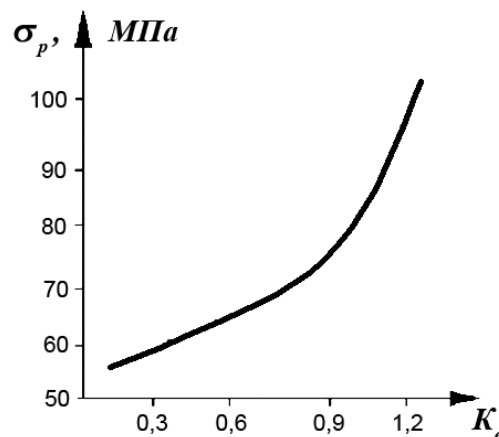


Рис. 4.47. Залежність розривного напруження УПС від K_e

Попередню витяжку проводять при формуванні виробів великої глибини з метою зменшення різнотовщинності; операція витяжки здійснюється нагрітим пуансоном без дотикання листа до стінок холодної форми.

Товщина виробу по висоті змінюється залежно від методу формування й наведена на графіку (рис. 4.48), (коли $H_{\text{виробу}}/B = 1$).

Як бачимо, виріб з попередньою витяжкою має значно меншу різницю товщини по висоті, ніж без неї.

Тиск формування розраховують (як при пневмо-, так і при вакуумформуванні) із залежності:

$$P = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \delta}{R}, \quad (4.60)$$

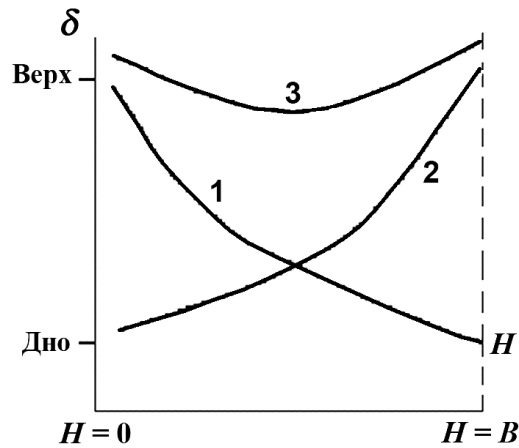


Рис. 4.48. Вплив методу формування на товщину виробу (δ):

1 – при формуванні в матриці; 2 – на пуансоні; 3 – у матриці з попередньою витяжкою;
 B – глибина форми

де: σ – максимально допустиме напруження в матеріалі, яке виникає при встановлених температурі і швидкості формування і не призводить до руйнування листа; δ – товщина листа, мм; R – умовний радіус дуги витяжки, мм.

Виріб охолоджують за рахунок подачі холодоагенту в стінки форми. Практично охолодження починається відразу після контакту матеріалу з холодною стінкою форми. Залежно від товщини стінки виробу і його конфігурації охолодження може бути одно- і двостороннім.

Час охолодження залежить від температури стінки форми, теплофізичних характеристик полімеру, товщини виробу і розраховується за умови нестационарного теплового потоку (див. "Екструзійне видування"). При двосторонньому охолодженні час зменшується в 4 рази.

Температура стінки форми впливає як на швидкість охолодження, так і на якість виробу. Зниження температури стінки форми, закономірно зумовлює прискорення процесу охолодження виробу; при цьому є меншою лінійна усадка після зняття виробу. Слід зауважити, що лінійна усадка завжди менша при формуванні на пуансоні. Це позитивний вплив зменшення температури форми. Однак, при цьому різке охолодження може викликати жолоблення виробу (особливо для ПЕВГ), утруднюється формування ребер і гострих кутів, зростає тиск формування. Надто низька температура форми може обумовити появу мікротріщин на поверхні (особливо при переробці жорстких і кристалічних полімерів у віддалених кутах чи сторонах виробу).

4.3.4. Основні способи термоформування

Залежно від засобів створення перепаду тиску над і під нагрітою заготовкою, термоформування підрозділяють на: вакуумне, пневматичне, гідравлічне, пароповітряне, механічне і комбіноване.

Метод термоформування, крім того, поділяється за конструкцією форми. Формування може здійснюватись на пуансоні (перенесення внутрішньої поверхні – позитивне формування) і в матриці (перенесення зовнішньої поверхні – негативне формування).

4.3.4.1. Вакуум-формування

Розрізняють негативний і позитивний методи вакуумного формування. Негативний метод (формування в матриці) дає можливість одержувати вироби, зовнішня поверхня яких точно копіює форму, чи рисунок внутрішньої поверхні матриці (рис. 4.49).

Листову заготовку закріплюють над формою чи камерою для формування за допомогою притискної рами, яка ущільнює матрицю і запобігає попаданню повітря в порожнину камери в процесі формування.

До поверхні притиснутого вздовж контуру листа підводять нагрівач. У формувальних установках використовують різні способи підігріву: теплорадіаційний, конвективний, контактний та змішаний.

Теплорадіаційний і контактний підігрів може бути одностороннім чи двостороннім. При конвективному способі підігріву як теплоносій використовується гаряче повітря, рідше – гаряча вода чи пара.

Після розігріву заготовки із загерметизованої форми відсмоктується повітря, створюється різниця тиску над листовою заготовкою і під нею. Заготовка втягується в порожнину форми, притискається до її поверхні – формується виріб. Тиск формування практично складає $0,060 \div 0,085$ МПа (граничний – 0,1 МПа). Його досить для оформлення виробів з листів, що мають товщину до 5 мм.

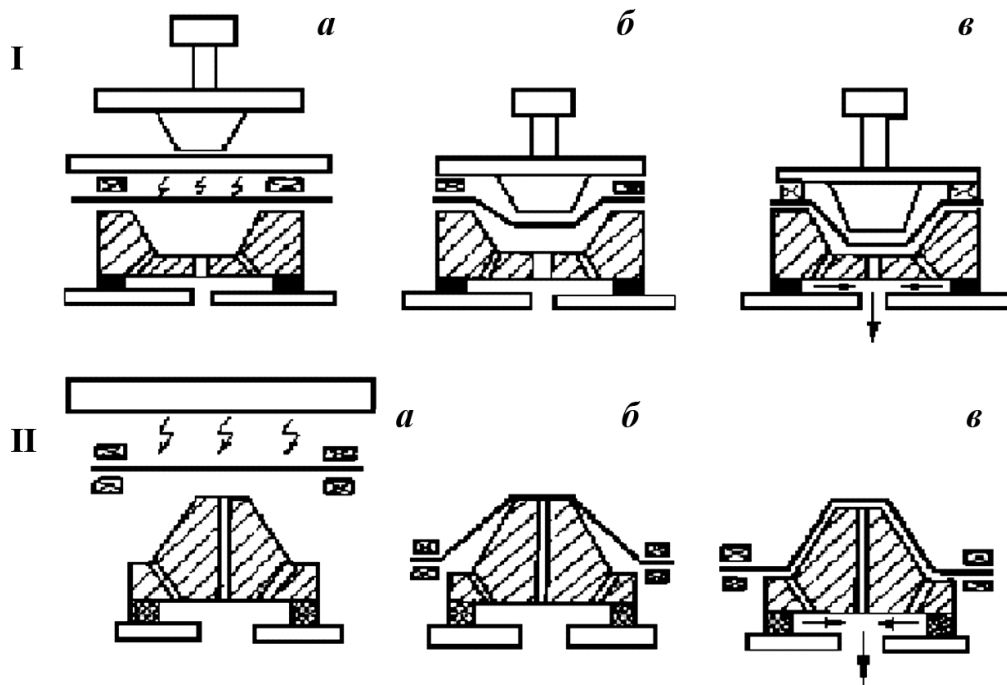


Рис. 4.49. Схема негативного (I) і позитивного (II) вакуум формування з попередньою механічною витяжкою:

а – нагрівання заготовки; б – попередня механічна витяжка; в – остаточне оформлення виробу

Процес негативного формування складається з двох стадій. Перша стадія – вільне формування, коли заготовка доторкається лише до верхньої кромки матриці. На цій стадії температура термопласту залишається практично незмінною.

Друга стадія – формування на інструменті, коли частина заготовки починає доторкуватися до робочої поверхні матриці. Температура термопласту знижується. На поверхні заготовки, що притуляється до формувального інструмента, утворюється тонка міцна плівка полімеру, що перебуває в склоподібному стані. Утворена плівка значно знижує здатність термопласту до деформації. Утворення нової ділянки бокової поверхні стінки практично повністю відбувається за рахунок об'єму матеріалу, який ще не доторкнувся до матриці. Останнє призводить до зменшення товщини заготовки, тобто до потоншення стінок виробу від горловини до днища (див. рис. 4.48). Найбільш тонкими вони є в кутках між стінками і днищем виробу.

Таким чином, недоліком негативного методу формування є значна різнотовщинність виробів при глибокому витягуванні, особливо в кутках виробів. Тому негативне вакуум-формування рекомендується для виготовлення виробів, у яких відсутні гострі кути, а також які мають відношення глибини до ширини, що не перевищує 0,5.

Позитивний метод (формування на пуансоні) дає можливість одержувати вироби, внутрішня поверхня яких точно копіює форму чи рисунок формувального інструмента. При формуванні цим методом нагрітий лист спочатку дотикається до поверхні пуансона, на якому утворюється днище майбутнього виробу. Тому при позитивному формуванні найбільша товщина виробу – на його днищі. Подальша зміна форми заготовки відбувається за рахунок витягування листа, який утворює бокові стінки виробу. Це призводить до того, що найбільш тонкою одержується горловина виробу (див. рис. 4.49).

Використання позитивного методу формування обмежується великими відходами матеріалу (на утворення стінки вздовж формувальної камери). Крім того, бажано цим методом переробляти листи, які не дають великого вигину під дією власної ваги, бо лист примикає до верхньої частини пуансона, що призводить до зростання різнотовщинності. Отже, вакуум-формування використовується для виготовлення тонкостінних неглибоких виробів.

4.3.4.2. Пневматичне формування.

При цьому методі формування виробів відбувається за допомогою стисненого повітря. Тиск формування змінюється від 0,15 до 2,5 МПа над поверхнею листа. Метод дозволяє формувати вироби складної форми і з жорсткіших матеріалів, ніж при вакуум-формуванні. Цим методом можна формувати вироби з товстих заготовок, використовуючи глибоку витяжку.

Переваги методу: високий тиск формування, більша точність розмірів виробів, відносно невелика різнотовщинність, висока продуктивність процесу. При цьому методі коли формуються глибокі вироби, використовується попередня витяжка жорстким пуансоном.

4.3.4.3. Гідравлічне і пароповітряне формування

Гідравлічне формування використовується для формування товстостінних виробів, коли перепад тиску під час формування такий значний, що використання пневматики не бажане з точки зору техніки безпеки. Гідроформування може здійснюватися трьома методами: безпосереднім подаванням рідини на формуючу заготовку, гідравлічним пуансоном з постійним об'ємом і гідравлічним пуансоном змінного об'єму. В останніх двох випадках використовуються еластичні мембрани.

Пароповітряне формування використовується в тому випадку, коли потрібне підтримання високої температури термопласту протягом всього періоду формування виробу.

4.3.4.4. Вільне видування

Цей спосіб застосовують при формуванні прозорих виробів з поліакрилатів, полікарбонатів. Він полягає в тому, що в повітряній камері створюється відповідний тиск повітря, який підтримується до повного охолодження листа (рис. 4.50).

Величина роздуву залежить від температури листа (прямо пропорційно) і від тиску повітря. Основна вимога до листа при формуванні – рівномірність температурного поля по всій площі виробу. У випадку використання рами (2) у формі кільця при збереженні цієї умови утворюється оптично правильна сфера.

Взагалі форму виробу визначає форма притискної рами. Можливий брак при такому способі – сріблястість у місці контакту з холодною рамою (це мікротріщини або внутрішні напруження).

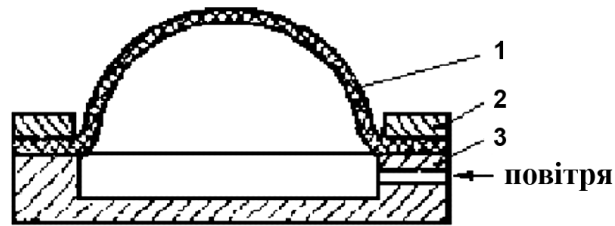


Рис. 4.50. Вільне видування: 1 – виріб; 2 – рама; 3 – піддон

Вироби, які отримують вільним формуванням: ліхтарі літаків, кабіни літаків, телефонні і захисні ковпаки та ін.

4.3.4.5. Механічне формування. Комбіновані методи

Тиск при механічному формуванні становить $40 \div 70$ МПа. При формуванні за допомогою спряжених металічних форм нагрітий лист розміщується на нижню частину форми – матрицю. Пуансон опускається, притискає заготовку до поверхні матриці і надає їй форму виробу. Може використовуватися також і неспряжений інструмент – еластичний пуансон і жорстка матриця чи навпаки – еластична матриця і жорсткий пуансон.

Одним з різновидів механічного формування є витягування на пуансоні (протяжка). Нагріту заготовку розміщують в затискній рамі і надають їй певної форми, втискаючи в неї пуансон (див. рис. 4.49).

На практиці часто використовують комбіновані методи термоформування: негативне й позитивне вакуум-формування з попередньою механічною витяжкою, формування з попередньою пневматичною витяжкою, коли роль пуансона виконує стиснуте повітря.

При негативному формуванні з попередньою механічною витяжкою є можливість одержання глибоких виробів з більш рівномірною товщиною стінок, ніж при простому негативному формуванні.

Переваги позитивного формування з попередньою механічною витяжкою такі: можливість одержання більш глибоких у порівнянні з простим позитивним формуванням виробів, скорочення кількості відходів, зменшення різнотовщинності виробу.

4.3.5. Технологія формування виробів термоформуванням

Технологічний процес термоформування виробів складається з таких основних операцій: доставка листів зі складу в приміщення формувального відділення, розмічання і розрізання листового матеріалу, закріплення в рамі, нагрів, формування, витримка на охолодження, механічна обробка, контроль готових виробів.

4.3.5.1. Розмічування і розрізання листового матеріалу.

Листи термопласту, які упаковані в дерев'яні ящики і перекладені папером, транспортують електронавантажувачами зі складу в приміщення відділення формування. На спеціальних столах ящики відкривають, листи термопласту укладають на пересувні стелажі, які підводять до формувальних машин (якщо розміри листа відповідають розмірам заготовок для формування) або направляють до столів для розмічування.

Розмічування листа – це спосіб раціонального розміщення на ньому майбутніх заготовок. Листи розмічають на столах, що мають чисту поверхню й обтягнуті м'якою тканиною. Його проводять за допомогою масштабної лінійки або спеціальних шаблонів. Розмічання можна робити гостро заточеним різцем чи олівцем, залишаючи припуск на розпил листа до 2 мм.

Максимальний розмір листової заготовки для термоформування розраховують, приймаючи до уваги збіжність (усадку) листа:

$$L = (D + 2e) \cdot \left(1 + \frac{Y}{100}\right), [\text{см}], \quad (4.61)$$

де: D – найбільший умовний діаметр виробу, см; e – ширина притискної рами, см; Y – збіжність (усадка) матеріалу при температурі формування, %, – визначають на стандартному зразку у вигляді квадрату зі стороною ≈ 100 мм.

Листи термопластів можна розрізати на гільйотинних ножицях із щільною між ножами не більш як $0,1 \div 0,2$ мм. Поверхню стола гільйотинних ножиць покривають м'яким матеріалом.

Тонкі листи термопластів ріжуть за допомогою розжареної електричним струмом ніхромової дротини.

Товсті листи термопластів розпилюють на стрічкових чи дискових пилах. Різальні полотна цих пил повинні мати дрібні зубці з невеликим розводом.

4.3.5.2. Формування виробів.

Формування виробів здійснюється на установках для формування (табл. 4.10). Основні технологічні параметри формування: температура нагріву листової заготовки, температура формувального інструменту (форми), робочий перепад тиску, швидкість витягування заготовки.

Температура нагріву заготовки впливає на умови формування, фізико-механічні властивості й однорідність товщини виробу. При заниженій температурі нагріву в кутках виробу можуть з'явитися так звані плями переохолодження ("відбілювання"), що свідчить про крихкість матеріалу. При підвищених температурах заготовка може провисати під дією власної ваги, крім того, можлива деструкція термопласту.

Таблиця 4.10

Основні технічні характеристики установок УМПФ і УМПВФ

Параметри	УМПФ-63	УМПФ-100	УМПФ-60	УМПФ-250	УМПФ-250-3
Зусилля, кН					
– змикання	630	1000	1600	2500	2500
– механічного вирубування і механічного витягування	90	125	200	400	400
Пневматичний тиск формування, МПа	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Потужність нагріву, кВт	11	19,5	23,4	30	53,6
Габарити виробу, мм					
– довжина	600	900	1100	1800	3000
– ширина	500	550	650	800	800
– висота	250	280	320	440	440
Максимальна продуктивність, шт/год	30	30	30	28	26

Температура формувального інструмента (матриці або пуансона) повинна бути нижча, ніж температура склування матеріалу, оскільки після зняття тиску виріб може втратити свою форму. Низька температура форми може стати причиною жолоблення та інших дефектів виробу. Температурні режими переробки деяких листових термопластів подані в табл. 4.11.

Робочий перепад тиску залежить від товщини листа, природи термопласту, конфігурації виробу, швидкості витягування. У випадку виробництва неглибоких виробів простої форми рекомендується вакуумне формування, при виготовленні виробів з більш

товстіших листів – пневматичне формування. Для одержання глибоких виробів зі складним тисненням на поверхні використовується механічне та комбіноване формування.

Швидкість витягування матеріалу залежить від товщини листа, температури і тиску формування.

Сповільнене витягування призводить до передчасного охолодження і розтріскування матеріалу; при високій швидкості витягування може відбутися розривання чи значне потоншення стінок у місцях поглиблень і в кутах виробу.

Таблиця 4.11

Температурні режими переробки деяких листових і плівкових термопластів методами пневмо- і вакуум-формування

Матеріал	Температура, °С		
	заготовки	матриці	допоміжного формув. інструмента
АВС - пластик	140 ÷ 160	40 ÷ 50	75 ÷ 115
ПВХ пластифікований	100 ÷ 160	40 ÷ 50	60 ÷ 150
Полістирол ударотривкий	110 ÷ 150	50 ÷ 65	80 ÷ 120
Поліпропілен	150 ÷ 200	50 ÷ 90	130 ÷ 160
Поліетилен високої густини	120 ÷ 135	50 ÷ 70	150
Поліетилен низької густини	90 ÷ 135	50 ÷ 70	150

Граничні значення глибини витягування (H/D) та двоосної деформації S_2/S_1 подані в таблиці 4.12.

Таблиця 4.12

Граничні значення глибини витягування та двоосної деформації S_2/S_1

Матеріал	H/D	S_2/S_1
АВС - пластик	2:1	4:1
ПВХ пластифікований	1:1	2:1
Полістирол ударотривкий	1:1	4:1
Поліпропілен	2:1	5:1
Поліетилен високої густини	1,5:1	3:1
Поліетилен низької густини	1,5:1	2,5:1

4.3.5.3. Механічна обробка.

Механічна обробка виробів включає витинання (вирубівання) готового виробу з відформованої заготовки, зачищення, шліфування та полірування його кромки та поверхні.

Вирубівання виробів проводять за допомогою вузла вирубки формувальної машини чи на допоміжному обладнанні.

Зачищення виробів відбувається вручну, на стрічкових чи дискових верстатах для зачищення, а також за допомогою шліфувальних машин.

Полірування виробів виконується на повстяних чи полотняних шліфувальних кругах.

4.3.5.4. Контроль готових виробів.

Готові вироби приймають партіями, що одночасно надходять на контроль. Зовнішньому огляду підлягають 100 % виробів.

Контроль геометричних розмірів виробів проводиться вибірково. Крім того, контролюють оптичні властивості прозорих матеріалів, різновтовщинність, фізико-механічні властивості згідно з діючими стандартами. З експлуатаційних випробувань проводять

найбільш характерні. Наприклад, панелі дверцят холодильників перевіряють на стійкість до багаторазових ударів, характерні аномалії процесу зведені в табл. 4.13.

Таблиця 4.13

Причини виникнення та способи усунення дефектів формованих виробів із листових і плівкових термопластів

Вид дефекту	Причини виникнення	Способи усунення
Зморшки і складки на стінках готового виробу	Перегрів листа; висока температура форми; нераціональна конструкція форми; малий радіус закруглення верхньої кромки форми; велика швидкість формування	Скоротити тривалість підігріву; взяти більш товстий лист; збільшити радіус закруглення; охолодити форму; зменшити швидкість формування
Нерівномірна різновтовщинність виробу	Нерівномірний підігрів заготовки; високий перепад температур термопласту й формувального інструмента	Змінити температуру по зонах нагрівачів; відрегулювати температуру форми і пуансона
Утворення пухирів	Зберігання листових заготовок у вологих умовах; перегрівання листа	Змінити умови зберігання матеріалу; підсушити листи; скоротити час нагрівання
Утворення тріщин у кутках та розриви	Високий перепад температури між гарячим листом і переохолодженою формою; циркуляція холодного повітря біля машини; дуже високий тиск формування; висока швидкість формування	Змінити умови формування і усунути протяги; зменшити тиск і швидкість формування;
Недооформлення виробу	Неправильний спосіб нагріву заготовок; недостатній тиск формування; нераціональна конструкція форми; засмічення повітряних каналів форми	Змінити спосіб нагріву; збільшити тиск формування; змінити розташування повітряних каналів і збільшити їх діаметр
Витягування матеріалу з-під затискувального пристрою	Недостатнє зусилля затискача; мала температура підігріву заготовки	Відрегулювати затискувальний пристрій; збільшити тривалість підігріву заготовки
Прилипання матеріалу до форми	Нераціональна конструкція форми; погана обробка робочих поверхонь; перегрів форми	Збільшити кут нахилу бічних стінок форми; покращити чистоту обробки робочих поверхонь; охолодити форму
Зміна кольору листа	Перегрівання заготовки	Зменшити час нагріву заготовки
Білий відтінок у перетині відформованого виробу	Витягування недостатньо нагрітого листа	Збільшити час нагрівання
Жолоблення виробу	Недостатній час охолодження виробу	Збільшити час охолодження

4.4. Технологія формування погонажних виробів методом екструзії

4.4.1. Загальні поняття

Екструзія – це неперервний метод формування, в основному, погонажних виробів, який полягає в перетисканні розтопу полімеру через профільний отвір відповідної конфігурації

(екструзійна головка) з наступною фіксацією форми виробу. Тиск в екструзійному агрегаті створюється за рахунок примусового, неперервного переміщення матеріалу вздовж гвинтової нарізки шнека при його обертанні (принцип м'ясорубки) (рис. 4.51).

Залежно від конфігурації профільного отвору можливі різновидності методу і різний асортимент виробів. Основу асортименту становлять пласкі (одинарні) та подвійні (рукавні) плівки, труби різних діаметрів, профільні вироби, листи, дубльовані матеріали, електро- і антикорозійні покриття, нитки полімерні, пакувальні засоби тощо.

Для екструзії використовують термопласти з високим значенням ефективної в'язкості, відповідно з низьким значенням ПТР, який, як правило, знаходиться в межах $0,3 \div 3$ г/10 хв. Можуть також використовуватись реакційно здатні олігомерні композиції та газонаповнені композиції. Використовують полімерну сировину у вигляді гранул або порошку.

Основним обладнанням для екструзії служать одно- і двошнекові екструдери, а також комбіновані дисково-шнекові екструдери. У дискових екструдерах тиск створюється за рахунок ефекту Вайсенберга, який полягає в зворотній до відцентрової сили течії розтопу до центру при обертанні диску.

Екструзія супроводжується лише фізичними процесами: деформація полімеру, топлення, в'язка течія і застигання (кристалізація). Хімічні процеси, які супроводжують екструзію – термо- і механодеструкція, є небажаними і при правильному режимі екструзії незначно впливають на процес.

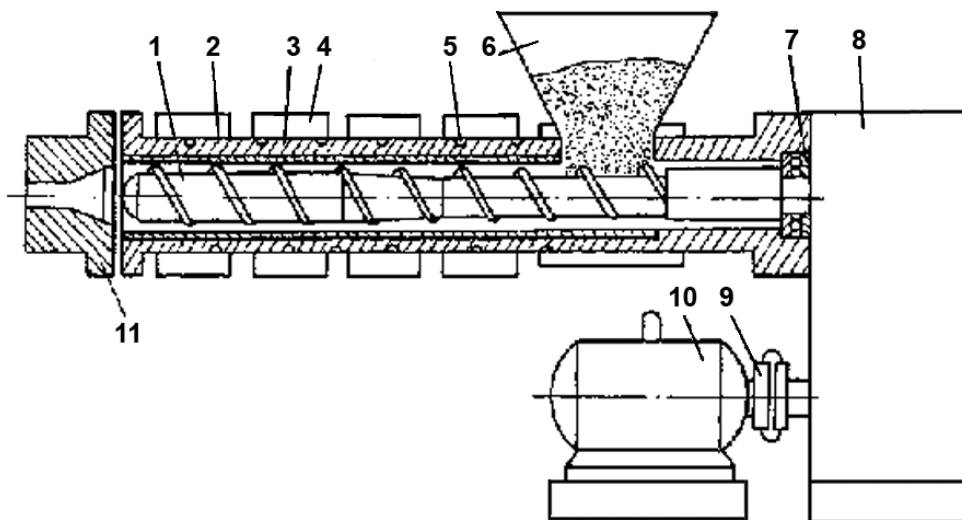


Рис. 4.51. Одношнековий екструдер з горизонтальним розташуванням циліндра:
1 – шнек; 2 – гільза; 3 – циліндр; 4 – електронагрівач; 5 – система охолодження;
6 – завантажувальна лійка; 7 – вузол опірної підшипника; 8 – редуктор; 9 – муфта;
10 – електродвигун; 11 – формувальна головка (філь'єра)

Внаслідок неперервності процесу екструзія є найпрогресивнішим і найперспективнішим методом переробки пластмас, який потребує найменших енерго- і матеріальних витрат та може бути повністю автоматизований і керуватись за допомогою ЕОМ. Порівняно простою справою є створення безвідходної (замкненої) лінії виробництва екструзійних виробів (наочний приклад цьому є діюче виробництво тонкої поліпропіленової плівки на Луцькому заводі пластмасових виробів).

Стадії процесу екструзії:

1. завантаження матеріалу та транспортування його обертанням шнека з відповідним нахилом гвинтової нарізки;
2. топлення матеріалу;
3. гомогенізація і дозування розтопу;

4. перетискання через профільний отвір (головку);
5. обробка екструдату з метою надання йому необхідних розмірів і властивостей – формування кінцевого виробу.

У зв'язку із цим екструдер умовно ділять на зони, які ми розглянемо в характеристиці екструзії, а екструзійний агрегат – комплексне устаткування, яке складається з екструдера, філь'єри й пристроїв обробки екструдату.

4.4.2. Загальна характеристика екструзії

У зв'язку з викладеними вище стадіями процесу екструзії в агрегаті виділяють три основні зони в напрямку руху матеріального потоку: 1) зона завантаження; 2) зона топлення (стиснення); 3) зона дозування (гомогенізації) (рис. 4.52).

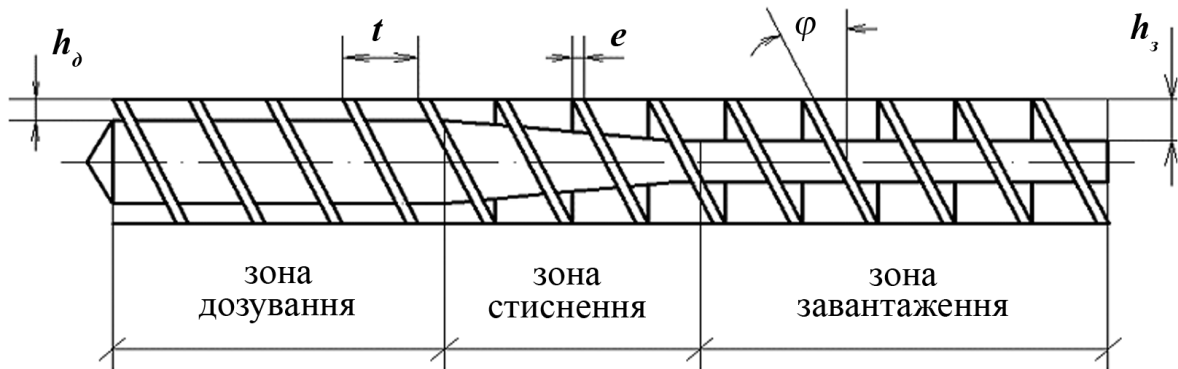


Рис. 4.52. Шнек загального призначення:

h_3 і h_0 – глибина нарізки в зоні завантаження й зоні дозування; t – крок;
 ϕ – кут нахилу гвинтової нарізки; e – ширина гребеня нарізки

Довжина кожної зони є непостійною, залежить від гранулометричного складу і теплофізичних характеристик сировини. Однак, при порівнянні зон для конкретного випадку, стає зрозумілим, що найкоротшою є друга зона, яка не перевищує $4D$ шнека.

Таблиця 4.14

Швидкість лінійна шнеку (найвища)

Шнекові агрегати	Швидкість лінійна, м/с
Одношнекові екструдери	
полімери термонестабільні	0,3
полімери термостабільні	0,5 ÷ 0,8
аутогермічні процеси	0,8 ÷ 1,5
Двошнекові екструдери	
конусні	0,15 ÷ 0,25
валкові	0,2 ÷ 0,35
Лінійні екструдери	
для реактопластів	0,3 ÷ 0,6
термопласти: полімери термонестабільні	0,5 ÷ 1,2
полімери термостабільні	0,7 ÷ 1,4

У зоні завантаження відбувається прийом із завантажувального бункера перероблюваного матеріалу і його переміщення в напрямку зони топлення з одночасним ущільненням. Для підвищення продуктивності екструдера нарізка на шнеку зони завантаження виконана глибшою з великим об'ємом.

У зоні стискання відбувається топлення полімеру, його ущільнення й подальше переміщення в напрямку до зони дозування. Нарізка зони топлення з меншою глибиною.

У зоні дозування відбувається перемішування гомогенізація розтопу, його безперервне накопичення на виході й внаслідок цього, розвивається тиск, який зумовлює перетискання розтопу через філь'єру (головку).

Для правильної роботи екструдера необхідною умовою є строге дотримання співвідношення продуктивностей кожної із зон. Стабільність процесу екструзії й висока якість екструдату спостерігається, коли $Q_z \geq Q_n \geq Q_d$, де: Q_z , Q_m , Q_d – відповідно, продуктивності зон завантаження, топлення і дозування. Коли ж $Q_z < Q_d$ і $Q_m < Q_d$, екструдер працює в „голодному режимі” з можливими пульсаціями і низьким К.К.Д. При „голодному” режимі значно погіршується якість екструдату, бо в такому випадку можливе захоплення не розтоплених частинок та повітряних бульбашок. Отже, завжди стежать, щоб зберігалась умова узгодженості ($Q_z \geq Q_n \geq Q_d$).

Для правильного встановлення продуктивностей зон і умов правильної роботи екструдера використовують математичний опис процесу на основі аналізу потоку матеріалу при обертанні шнека з відповідними геометричними параметрами.

Для математичного опису процесу використовують характер потоку матеріалу по довжині шнека. Потік у всіх трьох зонах складний, зі складових якого можна виділити три основних потоки:

1. потік прямий або вимушений, спрямований уздовж каналу шнеку, він зумовлює продуктивність зони (продуктивність – Q_{nm});
2. потік під дією перепаду тисків, що виникають на передньому зубі, – це зворотний потік, спрямований у протилежний від напрямку переміщення матеріалу бік (продуктивність – Q_{zn});
3. потік перетікання, який відбувається між торцем нарізки шнека й стінкою циліндра (інколи його розглядають як умовний потік, бо вважають, що переміщується гвинтова нарізка щодо матеріального рукава (чохла) (продуктивність – Q_{nep}).

Отже, продуктивність екструдера:

$$Q = Q_{nl} - Q_{zn} - Q_{nep} \quad (4.62)$$

Матеріал при течії має складний профіль швидкостей (рис. 4.53.)

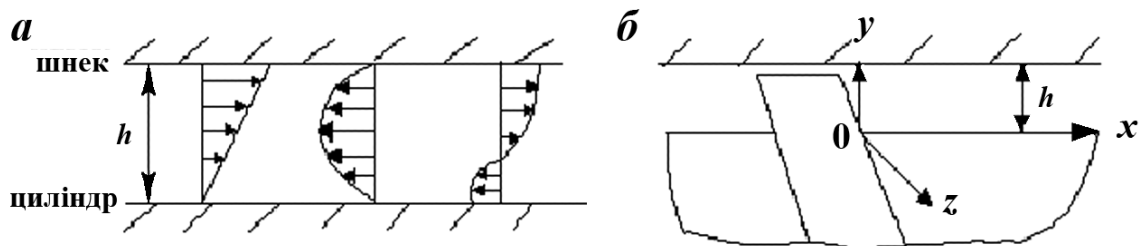


Рис.4.53. Профіль компонент швидкостей (а); розміщення координат у гвинтовому каналі (б)

Геометрія каналу шнека та профілі швидкостей використовуються для характеристики роботи окремо кожної зони екструдера.

4.4.2.1. Зона завантаження

Робота зони характеризується захопленням з бункера гранул матеріалу, проштовхуванням його з повертанням по довжині шнека. При цьому відбувається стискання гранул, їх деформація і саморозігрів як від внутрішнього тертя між гранулами, так і від тертя

гранул об стінки екструдера. Тому проводять охолодження шнека в місці завантаження сировини для запобігання утворенню суцільного корка з матеріалу, який злипається.

Продуктивність зони завантаження обчислюється, виходячи зі швидкості обертання шнека, гранулометричного складу і густини матеріалу:

$$Q_3 = \rho_n \cdot v_0 \cdot \int_{R_1}^{R_2} \left(2 \cdot \pi \cdot r - \frac{e}{\operatorname{tg} \varphi} \right) dr, \quad (4.63)$$

де: ρ_n – насипна густина матеріалу; v_0 – швидкість переміщення матеріалу в основному осьовому напрямку; r – радіус гранули; e , R_1 , R_2 – геометричні параметри екструдера (рис. 4.54 і 4.55).

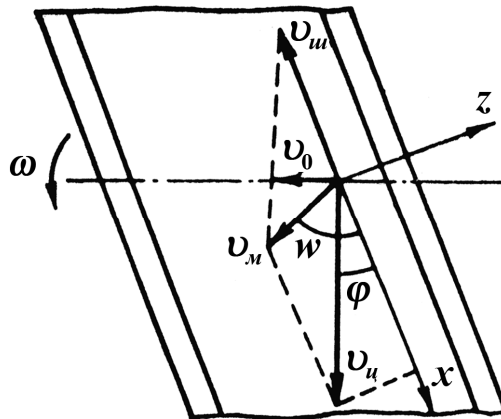


Рис. 4.54. Векторна діаграма швидкостей в зоні завантаження

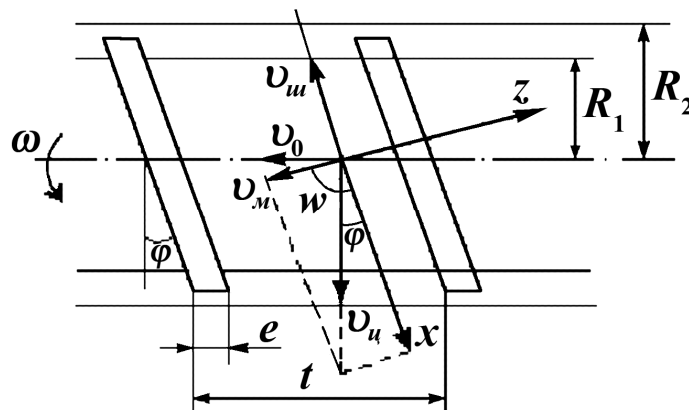


Рис. 4.55. Розподіл швидкостей у гвинтовій нарізці

Як бачимо, φ – кут нахилу гвинтової нарізки; v_m – швидкість руху відносно нарізки шнека; v_m і v_u – переміщення в каналі.

Отже, при розрахунку знаходять v_m і v_u , як проекції на вісь z . А умовний рух уздовж осі шнека знаходять як результат осьової швидкості:

$$v_0 = \omega \cdot R_{cp} \cdot (1 - \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{ctg} \varphi) \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi, \quad (4.64)$$

Отже, зі збільшенням глибини нарізки ($R_2 \div R_1$) і швидкості обертання зростає осьова швидкість у зоні, і продуктивність зони збільшується.

Насипна густина матеріалу в зоні дозування залежить від температури гранул і від тиску (P), який створюється при ущільненні матеріалу внаслідок обертання шнеку. Ця залежність зображена на графіку (рис. 4.56). Тиск у зоні визначається її довжиною і співвідношенням коефіцієнтів тертя матеріалу до стінок матеріального циліндра і шнека.

Температуру, до якої нагрівається матеріал при транспортуванні в зоні дозування, можна розрахувати як середнє інтегральне значення по глибині каналу гвинтової нарізки:

$$T_t = T_{\max} - \left[(T_{\max} - T_0) \cdot \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 \cdot a \cdot \tau}{h_3^2}\right) \right], \quad (4.65)$$

де: h_3 – глибина нарізки (див. рис. 4.53, б); a – коефіцієнт теплопровідності матеріалу; T_0 – початкова температура гранул; T_{\max} – максимальна температура на поверхні тертя:

$$T_{\max} = \frac{2 \cdot q_n \cdot \sqrt{L}}{\sqrt{\pi \cdot \nu_0 \cdot \lambda_n \cdot \rho_n \cdot c_n}} + T_0, \quad (4.66)$$

де: L – шлях проходження гранул; ν_0 – швидкість переміщення гранул; q_n – густина теплового потоку, який передається полімеру, обчислюється через адіабатичний коефіцієнт розподілу тепла на межі поділу полімер - метал (α); τ – час проходження гранул від завантаження до розрахункової точки в зоні:

$$\tau = \frac{L}{\nu_0}; \quad q_n = (1 - \alpha) \cdot q_{mp}, \quad (4.67)$$

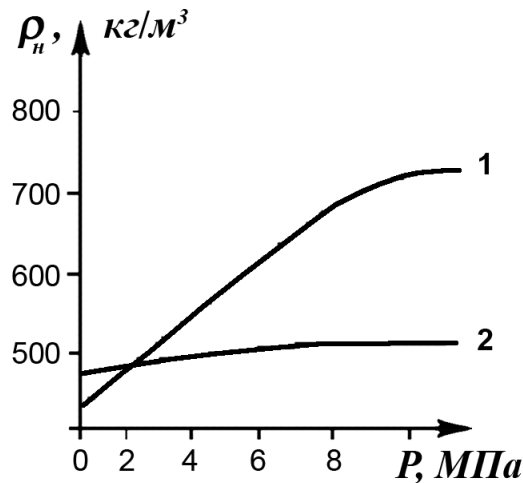


Рис. 4.56. Залежність ρ_n розтопу від тиску:

1 – температура в зоні (T_t) = 106 °C; 2 – температура в зоні (T_t) = 23 °C

З наведених залежностей видно, що, підвищуючи температуру і тиск у зоні завантаження, можна суттєво підвищити Q_3 .

4.4.2.2. Зона топлення

Матеріал у зону надходить у вигляді пористого корка. У зоні забезпечується повний перехід матеріалу у в'язкотекучий стан.

Нагрів полімеру залежить від теплових потоків, зумовлених теплопровідністю (зона нагрівається) і розігрівом від тертя та від дисипації енергії від зсуву при течії. Як правило, ззовні нагрівається циліндр екструдера. Тому біля стінок циліндра матеріал нагрівається більше і розтоп полімеру прогрівається від стінок. Оскільки при топленні гранул об'єм зменшується, шнек виконується з поступовим зменшенням глибини нарізки, що забезпечує безперервне стискання пористого шару гранул. Зниження пористості закономірно призводить до зростання коефіцієнта теплопровідності й, як наслідок, до підвищення швидкості топлення.

Оскільки матеріал при обертанні шнека рухається в напрямку ν_m (див. рис.4.55), то рух можна описати залежністю:

$$\frac{d\nu_x}{dy} = \frac{\nu_m}{\delta}, \quad (4.68)$$

де: δ – товщина плівки розтопу в зоні стискання.

Тоді, використавши залежність η від T як:

$$\eta = k_o \cdot e^{-B(T_\phi - T_k)}, \quad (4.69)$$

можна записати реологічне рівняння течії розтопу в каналі:

$$\tau_u = k_o (\omega \cdot R_{cp} \cdot \sin \varphi / \delta \cdot \sin \gamma)^n \cdot e^{-B(T_\phi - T_k)}, \quad (4.70)$$

де: $T_{сер}$ – середня температура розтопу; T_k – температура, при якій вимірюється коефіцієнт в'язкості.

Напруження зсуву τ_u визначає крутний момент на шнеку:

$$dM_u = \tau_u \cdot B \cdot R_3^2 \cdot \cos \gamma \cdot d\theta, \quad (4.71)$$

де: θ – кут обертання навколо осі шнека.

Таким чином, знаючи необхідну швидкість руху матеріалу (для забезпечення потрібної продуктивності зони), можна через крутний момент обчислити швидкість обертання. І навпаки, за швидкістю обертання шнека можна визначити продуктивність зони. Важливе технологічне значення має геометрія шнека в зоні топлення, а саме: довжина зони, глибина та нахил гвинтової нарізки. Як вже зазначалося, полімер, проходячи в зоні топлення, повинен повністю перейти у в'язкотекучий стан, що забезпечується відповідним тепловим балансом і геометрією шнека.

Внаслідок теплового потоку від стінок циліндра топлення полімеру відбувається поступово з утворенням плівки розтопу у верхній частині потоку. В процесі пересування полімеру ширина і товщина шару гранул зменшується, а кількість розтопу біля напірної грані зростає. Топлення прискорюється від тертя, яке найбільше проявляється при стінці шнека. Від швидкості топлення гранул суттєво залежить гомогенізація розтопу в зоні дозування й відповідно якість виробу. Чим швидше завершується топлення, тим вища однорідність розтопу в зв'язку з тим, що краще відбувається його перемішування. Продуктивність зони топлення залежить від теплофізичних характеристик полімеру, геометрії і кінематичних параметрів шнека, коефіцієнта тертя полімеру та полімеру до металу.

Довжину зони топлення можна розрахувати спрощено з емпіричної залежності:

$$z_n = \frac{2 \cdot G}{\phi \cdot t^{0,5}}, \quad (4.72)$$

де: G – об'ємна витрата твердого корка; ϕ – швидкість топлення, залежить від теплофізичних характеристик матеріалу, температури зон, швидкості руху матеріалу в каналі шнека; t – крок нарізки.

4.4.2.3. Зона дозування

Характер роботи зони впливає на продуктивність екструдера і якість розтопу, тому призначення зони – пластикація і дозування.

Робота зони характеризується процесом в'язкої течії неньютонівської рідини в кільцевому циліндричному каналі. Складність течії полягає в різниці зусиль зсуву по глибині і ширині каналу, а також у наявності адгезії полімеру до стінок циліндра і шнека.

У реальних процесах екструзії гомогенізація забезпечується за рахунок швидкості зсуву потоку навкруги осі шнека в каналі (v_k) і місцевої циркуляції розтопу біля напірної грані нарізки шнека (v_u). Циркуляція залежить від перепаду тисків між зонами біля напірної й передньої стінок каналу шнека. Епюри швидкостей і напрям потоку зображені на рисунку 4.57.

Осьову (v_0) швидкість і швидкість руху розтопу в каналі (v_3) використовують разом з геометричними і кінематичними даними шнеку для розрахунку продуктивності шнека.

У зоні дозування рух полімеру здійснюється за рахунок в'язкої течії. Більшість полімерів характеризуються у в'язкотекучому стані адгезією до металів, тому при течії вони

не проковзують відносно поверхонь циліндра і шнека. Через це розтоп між циліндром і шнеком тече в кільцевому циліндричному каналі. В даному випадку розтоп біля стінки циліндра нерухомий, а біля шнека обертається разом з ним зі швидкістю $v_\theta = \omega R_1$.

Оскільки біля набігаючої грані шнека тиск найбільший, то по ширині і глибині каналу створюються градієнти тисків dP/dz і dP/dr (див. рис. зони завантаження). Під дією осьового тиску dP/dz розтоп тече від набігаючої грані вздовж осі по кільцевому каналі зі швидкістю v_z . При цьому v_z біля стінки шнека і циліндра дорівнює нулю, а максимальне значення має в середній частині каналу. Градієнт dP/dr зумовлює циркуляцію біля напірної грані. Поряд із цими течіями, як видно з епюри швидкостей в'язкої течії, має місце обертовий рух розтопу (v_k), осьовий рух уздовж осі шнека в кільцевому зазорі (v_0). Крім того, під дією тиску, що виникає біля напірної грані, частина розтопу немовби перетікає через радіальний зазор (потік перетікання v_{nep}). Це умовний потік, як правило, бо внаслідок тиску підпору розтоп стоїть у вигляді труби на місці, а грань переміщується вперед при обертанні.

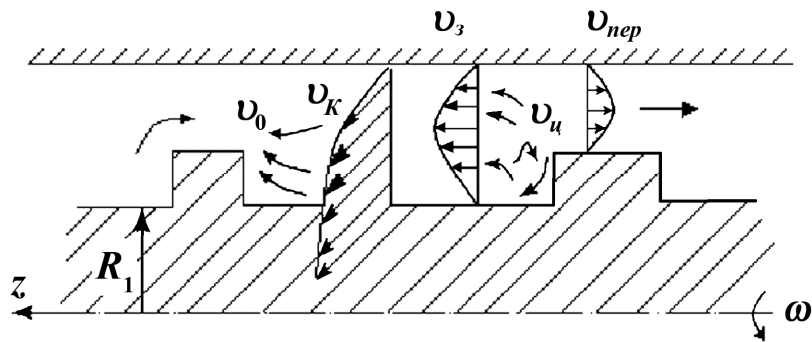


Рис. 4.57. Розподіл і профіль швидкостей у каналі шнека зони дозування

Перетік суттєво залежить від різниці тисків, які створюються в зоні завантаження, з одного боку, та екструзійної головки – з другого. Чим більший опір створює головка, тим менша швидкість v_z і зростає перетікання. Отже, зменшується кількість полімеру, що витискається з екструдера. Таким чином, перепад тиску визначає продуктивність екструдера.

У тому випадку, коли тиск на вході в зону дозування більший, ніж тиск на виході з екструдера, апарат працює в дросельному режимі (дозування відбувається зі зменшенням тиску по довжині). Тоді продуктивність зростає зі збільшенням перепаду тиску по довжині шнека. При зменшенні перепаду, тобто при створенні опору для виходу розтопу, зменшується осьовий потік v_z , і продуктивність екструдера зменшується. У випадку від'ємного градієнта тиску по довжині шнека переважає протитечія, і обертовий рух (v_r) розтопу – це насосний режим. Пониження продуктивності від перепаду тиску в зоні дозування – негативне явище. Однак у такому випадку зростає час деформування розтопу, більший час розтоп переміщується, зростає напруження зсуву для перемагання опору. Все це поліпшує гомогенізацію розтопу, і, отже, підвищується якість виробів.

У реальних умовах екструзування вплив перепаду тиску, який створюється екструзійною головкою, на продуктивність має двоїстий характер:

1. зі зростанням перепаду тиску на головці (зростає опір головки) продуктивність зони дозування зменшується (рис. 4.58, криві 1' і 2');
2. підвищення перепаду тиску на головці призводить до зростання кількості екструдату, який перетискається через головку (рис. 4.58, криві 1 і 2).

За оптимальну продуктивність екструдера беруть продуктивність зони в точці перетину (Q_{opt}) залежностей 1 і 1' чи 2 і 2'. Позначки на кривих відповідають наступним умовам:

- переріз кільця головки 1 більший за переріз кільця 2;
- 1 – дросельний режим роботи екструдера;

– 2 – насосний режим роботи екструдера.

З рисунку видно, що:

$$Q_{onm}^d \geq Q_{onm}^n, \quad (4.73)$$

Тут „d” і „n” – відповідно, дросельний і насосний режими.

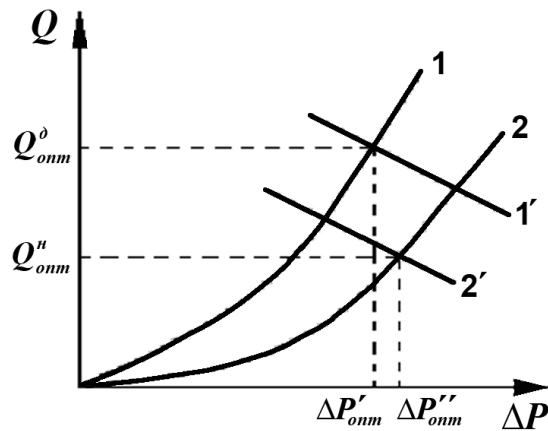


Рис. 4.58. Залежність продуктивності від перепаду тиску:
1, 2 – характеристика головки; 1', 2' – характеристика шнека (екструдера)

Продуктивність головки можна розрахувати із залежності:

$$Q_{гол} = k \cdot \frac{\Delta P}{\mu_{ef}}, \quad (4.74)$$

де: ΔP – перепад тиску в головці; μ_{ef} – ефективна в'язкість розтопу.

Продуктивність екструдера залежить також від глибини нарізки на шнеку. Продуктивність зони зростає із поглибленням нарізки. Але характеристика такого шнека більш крута, що викликає сумарне зниження продуктивності екструдера при зростанні опору головки (рис. 4.59).

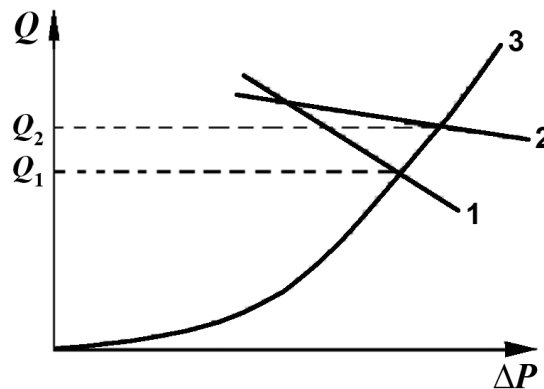


Рис. 4.59. Вплив глибини нарізки на продуктивність екструдера:
1 – глибина нарізки h_1 ; 2 – глибина нарізки h_2 ($h_1 > h_2$); 3 – характеристика головки

Крім цього, слід зауважити, що при меншій глибині нарізки кращою є гомогенізація розтопу внаслідок зростання градієнта швидкості течії в осьовому напрямку.

Як бачимо, на продуктивність екструдера має вплив ряд факторів, які можна звести в загальну залежність:

$$Q_{з.о} = F_1 \cdot \alpha \cdot N - F_2 \cdot \frac{\beta}{\mu_{ef}} \cdot \Delta P, \quad (4.75)$$

де: F_1 і F_2 – коефіцієнти, які враховують геометрію шнека (кут нарізки φ , ширина нарізки, глибина каналу і т.д.); α і β – коефіцієнти, які враховують реологічну характеристику

матеріалу; N – число обертів шнека; μ_{ef} – ефективна в'язкість розтопу; ΔP – перепад тиску в екструдері.

Оптимальною роботою екструдера є робота в умовах певної узгодженості роботи всіх зон екструдера і головки, рівності їх продуктивностей, тоді забезпечується Q_{onm} .

Характеристика екструдера визначається співвідношенням прямогоку й протитоку:

$$a = \frac{Q_n}{Q_{nm}}, \quad (4.76)$$

де: Q_n – прямоток забезпечується, коли $\Delta P = P_{nl} - P_{доз} > 0$, а; Q_{nm} – протиток забезпечується, коли $\Delta P = P_{nl} - P_{доз} \leq 0$, де P_{nl} і $P_{доз}$ – відповідно тиск у зоні топлення і дозування; якщо $a = 0$ – насосний режим; $a = 1$ – дросельний режим.

Для забезпечення необхідної якості розтопу і потрібної продуктивності розраховують геометрію шнека в зоні дозування.

Довжину зони дозування можна визначити з рівняння:

$$L_{з.д} = \frac{2 \cdot \tau \cdot \pi \cdot \omega \cdot D \cdot \sin \varphi}{\sin(\gamma - \varphi)}, \quad (4.77)$$

де: D – діаметр шнеку; τ – час проходження матеріалу; φ і γ – кути нарізки (див. зону завантаження).

Розраховану продуктивність екструдера узгоджують з потужністю, яку споживає екструдер (W), і визначають з залежності:

$$\frac{W}{Q_\varepsilon} = \int_{T_1}^{T_2} \rho \cdot C_p \cdot dT + \frac{\Delta P}{\rho} + \lambda, \quad (4.78)$$

де: T_1 і T_2 – температура полімеру на вході і виході з екструдера; λ – теплота топлення полімеру; ΔP – протитиск – опір у головці; Q_ε – продуктивність екструдера.

4.4.3. Технологія формування плівок екструзійним методом

Існує два основних способи екструзії плівок, які відрізняються формувальним елементом – екструзійною головкою. Вид плівки залежить від конфігурації формувального елемента (від профілю його щілини). Коли для екструзії використовується плоскощілинна головка (рис. 4.60), одержують пласку (одинарна) плівку. При використанні головки з кільцевою щілиною отримують рукавну (подвійну) плівку (рис. 4.61).

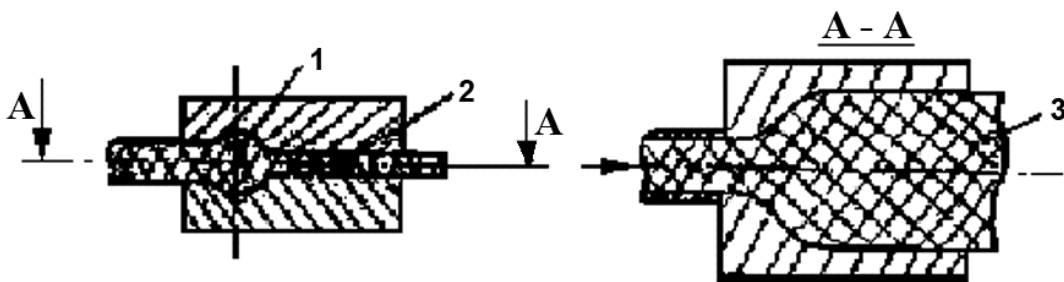


Рис. 4.60. Схема плоскощілинної головки:

1 – колектор; 2 – щілина; 3 – плівка (полотно екструдату)

До плівок відносять суцільні пласкі вироби, які мають товщину меншу, ніж 125 – 500 мкм. Нижня межа відновиться до виробів з жорстких полімерів (ПС, естери целюлози), верхня – для плівок з еластичних полімерів (ПЕ, ПВХ - пластикат).

Розміри плівок визначаються як полімером, так і методом їх одержання: зараз одержують плівки товщиною від 2 мкм до 500 мкм і шириною від 0,3 до 24 м.

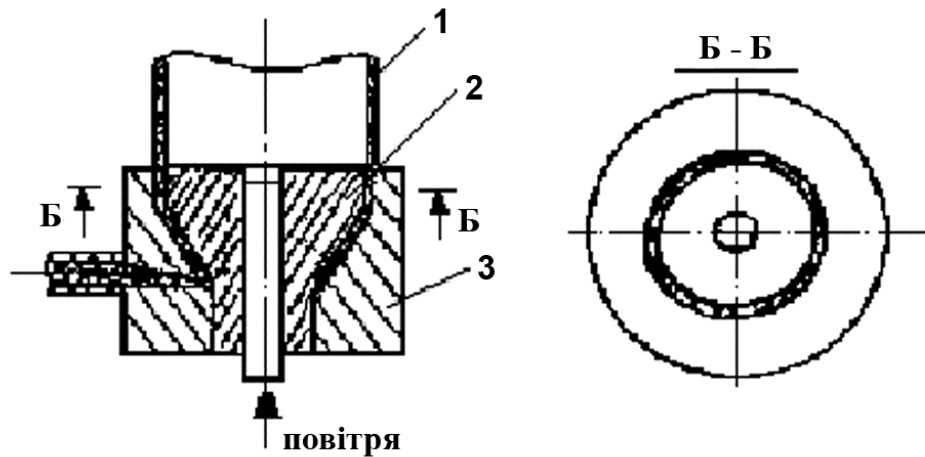


Рис. 4.61. Схема кільцевої головки:

1 – трубна заготовка (екструдат); 2 – дорн; 3 – циліндр (мундштук)

Для виготовлення плівок екструзійним методом придатні поліолефіни (ПП, ПЕ), полістирол, пластифікований ПВХ, полівініліденхлорид, поліетилентерефталат, деякі марки поліамідів, кополімери етилену і вінілацетату, естери целюлози. Останнім часом для виготовлення плівок використовують піноматеріали.

Плівки використовують для електроізоляційних, радіотехнічних цілей, для побутових потреб як пакувальні засоби. Крім плівок з однорідних полімерів випускають також армовані, багатоколірні, багат шарові та комбіновані плівки.

4.4.3.1. Технологічний процес формування плівки екструзією з роздувом рукава (рукавний метод)

Технологічний процес формування плівки екструзією з роздуванням рукава складається з наступних стадій: підготовки сировини, стадії формування і завершальних стадій.

Підготовка сировини включає:

- сортування за партіями (для екструзії категорично заборонено змішування партій, бо для кожної партії сировини проводиться налагоджування технологічного режиму);
- контроль вмісту вологи і технологічних параметрів сировини;
- підсушування;
- транспортування – здійснюється транспортними засобами цеху, а подача сировини в бункер екструдера проводиться індивідуальним пневмотранспортом.

Завершальні операції можуть бути такими: контроль якості плівки, радіаційна обробка, можливе нарізання на стрічки, намотування в рулони, пакування і складування. При контролі якості плівки контролюють товщину (безперервно), прозорість та зовнішній вигляд.

Рукавний метод одержання плівок – простий, високопродуктивний і економічний. Можливі три схеми одержання рукавних плівок екструзією з наступним роздувом: 1) з подачею рукава вгору; 2) з прийманням рукава вниз; 3) з горизонтальним відбором рукава.

Найпоширеніша перша схема. Вона економічна з невеликими технічними ускладненнями, агрегат займає мало площі. Схема екструзійної установки подана на рис. 4.62.

При формуванні плівки методом рукавної екструзії з подачею рукава вгору лінія включає такі стадії:

1. підготовка розтопу: завантаження сировини, топлення, гомогенізація і нагнітання розтопу полімеру;
2. перетискання розтопу через кільцеву головку;

3. роздув рукава і його охолодження;
4. складання рукава;
5. намотування плівки на шпулі.

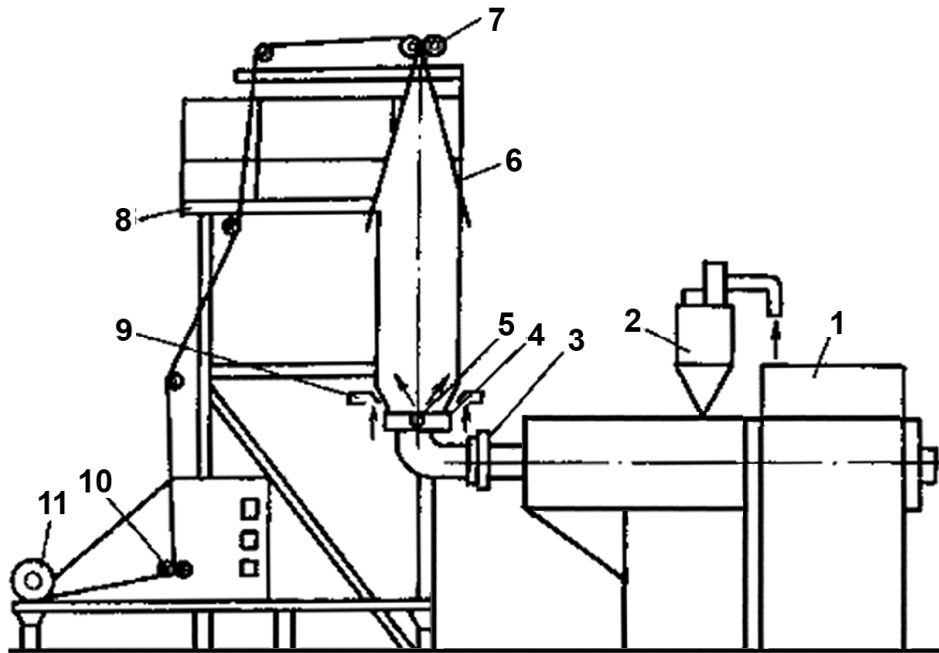


Рис. 4.62. Схема агрегату для одержання плівок рукавним методом з подачею рукава вгору:
 1 – екструдер; 2 – бункер; 3 – фільтр; 4 – головка; 5 – трубопровід для подачі повітря; 6 – щоки для складання трубчастого рукава; 7 – тягові валки; 8 – естакада; 9 – охолоджувальне кільце;
 10 – спрямовуючі валки; 11 – намотувальний пристрій

Агрегат з відведенням рукава вниз використовують для виробництва плівок невеликих розмірів, бо під дією власної ваги рукав може обірватися на ділянці, де полімер перебуває у високоеластичному стані. До переваг такої схеми можна віднести більш легке налагоджування технологічного процесу й краще охолодження плівки (рис. 4.63).

Недоліком перших двох схем є поворот течії розтопу при вході в кутову головку, що викликає небезпеку перегріву і термодеструкції полімеру.

Горизонтальну схему використовують в агрегатах і автоматизованих лініях для виробництва мішків, де ступінь роздуву невеликий, а товщина плівки перевищує 200 мкм. Цим методом одержують плівки з термостабільних полімерів (наприклад, з полівінілхлориду) (рис. 4.64).

У процесі формування плівки можлива іонізаційна обробка (для зняття статичної електрики), радіаційна обробка (для підвищення міцності плівки). Проводиться періодичний, або постійний контроль товщини і якості плівки. Товщину міряють вручну мікрометричним методом (коли від рукава відтинається смужка плівки), або неперервно за допомогою фото- чи радіаційних датчиків, які можуть бути підключені до регуляторів, що включені в загальну схему регулювання за допомогою ЕОМ, або виведені на щит керування. Другий метод більш прогресивний і потребує поширення в промисловості.

Якщо треба одержати плівку великого діаметру й товщини, використовують спарену екструзію, коли працюють три й більше екструдери, які нагнітають розтоп в одну головку (рис. 4.65).

Аналогічну схему використовують при формуванні багатошарових плівок, різниця лише в кількості колекторних каналів в екструзійній головці. При формуванні багатошарових плівок на кожен полімер існує окремий колектор.

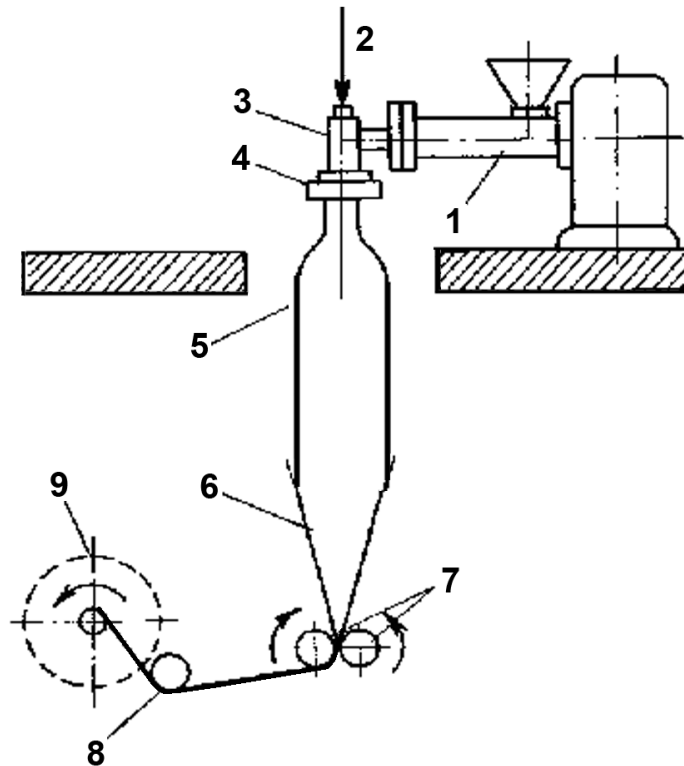


Рис. 4.63. Схема агрегату для одержання плівок екструзією з наступним роздувом рукава (приймання рукава вниз):

- 1 – екструдер; 2 – подача стисненого повітря; 3 – головка екструдера;
4 – охолоджуюче кільце; 5 – рукав; 6 – щоки для складання рукава;
7 – тягові валки; 8 – натяжний ролик; 9 – намотувальний пристрій

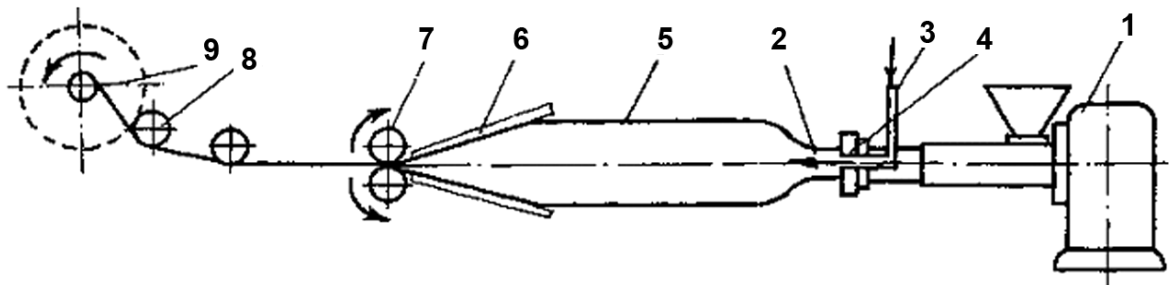


Рис. 4.64. Схема агрегату для одержання плівок рукавним методом з горизонтальним відбором рукава:

- 1 – екструдер; 2 – одержувана плівка; 3 – подача стисненого повітря; 4 – кільце повітряного охолодження; 5 – рукав після роздуву; 6 – щоки для складання рукава; 7 – тягові валки;
8 – натяжний ролик; 9 – намотувальний пристрій

а) Основні технологічні параметри екструзії плівки з роздуванням рукава

Режим екструзії рукавної плівки – це комплекс технологічних параметрів, які обчислюються для кожної партії матеріалу і при переході на іншу партію обов'язково уточнюються.

Технологічний режим визначають такі параметри:

1. температура по зонах циліндра екструдера, переходу і головки;
2. число обертів шнека;
3. тиск у головці;
4. температура і кількість повітря, яке йде на обдування (охолодження) рукава;

5. ступінь роздування рукава;
6. ступінь поздовжньої витяжки.

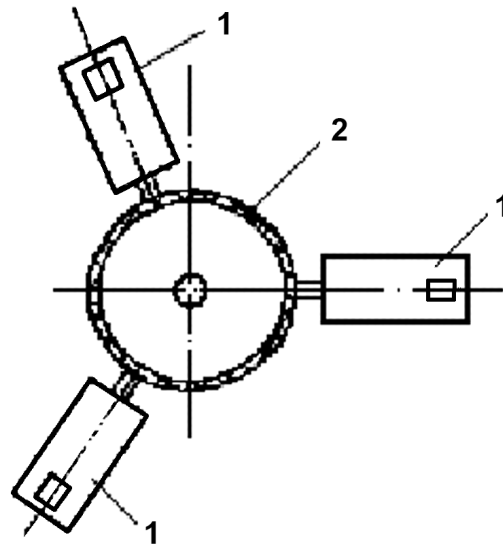


Рис. 4.65. Схема спареної екструзії (ко-екструзії):
1 – екструдер; 2 – екструзійна головка

Якщо перші три параметри визначають продуктивність екструдера і якість екструдованого розтопу (розділ 2), то наступні параметри – характеристики (властивості) отриманої плівки (її товщину, оптичні і фізико-механічні властивості).

Ступінь роздуву:

$$n_p = \frac{D_p}{d_{сер}}, \quad (4.79)$$

де: D_p – діаметр рукава після роздування; $d_{сер}$ – середній діаметр екструзійної щілини. Величина ступеня роздуву перебуває в межах 1,5 ÷ 4,5 і залежить від тиску і температури повітря, яке подається в рукав (прямо пропорційно), кількості повітря для обдування на охолодження (обернено пропорційно).

Ступінь поздовжньої витяжки залежить від співвідношення швидкості намотування (відведення плівки) і швидкості екструдуювання розтопу:

$$n_e = \frac{v_n}{v_e}, \quad (4.80)$$

Швидкість екструдуювання можна виразити як об'ємну витрату:

$$v_e = \frac{V}{F_{щ}}, \quad (4.81)$$

де: V – об'єм екструдованого розтопу за одиницю часу; $F_{щ}$ – площа щілини екструзійної головки. Або:

$$v_e = \frac{G}{\rho \cdot \pi \cdot d_{сер} \cdot \delta}, \quad (4.82)$$

де: G – маса розтопу, екструдована за одиницю часу; ρ – густина розтопу; δ – товщина (ширина) кільцевої щілини головки; $d_{сер}$ – середній діаметр кільцевої щілини.

Слід також зауважити, що ступінь витяжки залежить від швидкості тверднення, тобто інтенсивності обдування, температури розтопу й теплофізичних характеристик полімеру. Ступінь витяжки визначає товщину плівки і її фізико-механічні властивості.

На якість плівки суттєво впливає температура розтопу й швидкість його екструдуювання, а також коефіцієнт (ступінь) роздування. При збільшенні температури розтопу підвищується

прозорість плівки, особливо товстої. Це можна пояснити зниженням напружень зсуву в розтопі й підвищенням ступеня аморфізації кристалічного полімеру. Швидкість екструзії на прозорість впливає обернено пропорційно, однак ця залежність значно згладжується при збільшенні ступеня роздуву.

У таблиці 4.15 подані орієнтовні режими екструзії плівок з роздувом рукава для поліолефінів.

Таблиця 4.15

Режими екструзії з роздувом рукавних плівок із поліолефінів

Термопласт	Температура циліндра за зонами, °С				Температура головки за зонами, °С		Тиск у головці, МПа
	1	2	3	4	1	2	
ПЕНГ	125	135	135	145	140	140	10 ÷ 15
ПЕВГ	140	160	175	180	180	185	13 ÷ 19
ПП	185	215	235	245	250	250	15 ÷ 20

б) Вплив ступеня роздуву і швидкості охолодження на фізико-механічні властивості плівки

Фізико-механічні властивості змінюються неоднозначно при зміні одного з параметрів, тобто на них справляє вплив сумісна дія всіх параметрів – це й температура розтопу, швидкість екструзії і швидкість охолодження, ступінь витяжки і роздуву.

Співвідношення швидкості охолодження розтопу і ступеня роздуву значною мірою визначає форму рукава в нижній частині (на виході з головки) і в кінцевому підсумку впливає на фізико-механічні властивості плівки вздовж і поперек напрямку екструзії. Можливі форми рукава зображені на рис. 4.66.

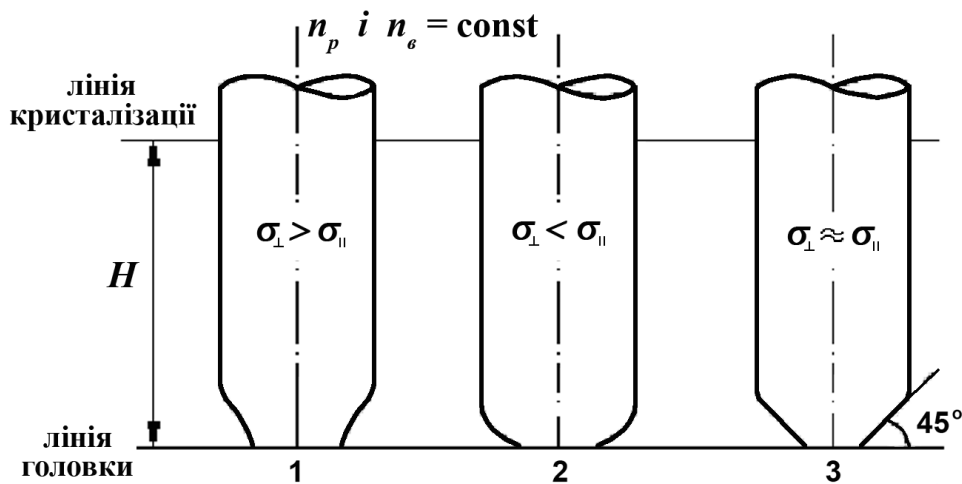


Рис. 4.66. Вплив інтенсивності обдування на форму рукава

Форма рукава залежить, у першу чергу, від інтенсивності охолодження. На рисунку 4.66 зображені крайні випадки та оптимальний випадок охолодження. Тут 1 – максимально швидке охолодження. Внаслідок швидкого при такому охолодженні наростання в'язкості відбувається швидка фіксація випрямлення макромолекул у напрямку дії внутрішнього тиску роздуву (в горизонтальному напрямку). Орієнтація в горизонтальному напрямку є значною, бо через велику в'язкість виникають великі орієнтаційні напруження зсуву в радіальному напрямку, які не можуть релаксувати. Через це міцність у поперечному напрямку плівки значно перевищує міцність у поздовжньому напрямку: $\sigma_{\perp} > \sigma_{\parallel}$.

У випадку повільного (недостатнього) охолодження маємо випадок 2 – мінімальна швидкість охолодження. При витягуванні плівки спостерігається в основному орієнтація полімеру у вертикальному (поздовжньому або тангенціальному) напрямку через повільне наростання в'язкості. У зв'язку із цим міцність плівки в напрямку витяжки значно перевищує міцність плівки в радіальному (горизонтальному) напрямі: $\sigma_{\perp} < \sigma_{\parallel}$. Це варіант 2.

Варіант 3 – оптимальний варіант охолодження забезпечує рівномірну витяжку й однакову орієнтацію вздовж і перпендикулярно до напрямку витяжки, тому міцність в обох напрямках близька за значеннями: $\sigma_{\perp} \cong \sigma_{\parallel}$.

в) Технологічні особливості екструзії рукавної плівки і проблеми, які виникають при її реалізації

Тепловий режим екструзії впливає на властивості плівок. При низьких температурах розтопу відбувається значне витягування плівки, що супроводжується орієнтацією макромолекул і підвищенням її міцності, а також появою поверхневих дефектів. При високій температурі розтопу швидше проходить релаксація напружень, які виникають у полімері при роздуванні і при витяжці. Підвищена температура екструзії забезпечує плівці кращу прозорість і блиск.

Як видно, температура переробки при цьому методі є нижчою, ніж при литті під тиском, що обумовлене необхідністю запобігання обриву рукава.

Товщина і фізико-механічні властивості плівки, як уже зазначалося, залежать від:

- а) поздовжньої витяжки, яка задається швидкістю екструдкування;
- б) від ступеня роздуву, що залежить від надлишкового тиску повітря всередині рукава і визначається здатністю розтопу до деформування. При надто великому ступені витяжки чи роздування плівка, як це було зазначено вище, набуває явно вираженої анізотропії міцності.

Шлях, на якому здійснюється витяжка, залежить від швидкості тверднення (кристалізації) розтопу (переходу із в'язкотекучого стану у високоеластичний чи склоподібний).

У свою чергу довжина зони витяжки залежить від природи полімеру (його теплофізичних характеристик) і швидкості (інтенсивності) охолодження.

При оформленні технологічної схеми важливо також знати загальну довжину рукава до складання, яка повинна узгоджуватися з температурою злипання полімеру (температурою липкості). Так, для ПЕ ця температура повинна бути нижчою, ніж 40°C.

Для отримання прозорої плівки з добрими фізико-механічними властивостями довжина зони в'язкотекучого стану повинна бути невеликою, бо зі зменшенням швидкості охолодження зростає імовірність кристалізації та зростання концентрації напружень зсуву, які викликають помутніння плівки і анізотропію її властивостей.

Для інтенсифікації охолодження і вирівнювання умов тверднення плівки із зовнішньої і внутрішньої сторін рекомендується двостороннє охолодження (рис 4.67, а).

Однак, при охолодженні повітрям внаслідок порівняно невеликих значень коефіцієнта тепловіддачі виникає відчутний температурний градієнт між поверхнею плівки та повітрям, тому теплообмін є малоефективним. Щоб прискорити охолодження з рівномірним тепловим потоком, використовують рідинне (водяне) охолодження (рис. 4.67, б). Внаслідок значно вищої, порівняно з повітрям, теплопровідності води, ефективність рідинного охолодження може бути підвищена в 1000 разів відносно повітряного. Рідинне охолодження, як правило, використовують при витяжці плівки вниз. Недоліком такого методу є проблема відокремлення води від плівки (її висушування).

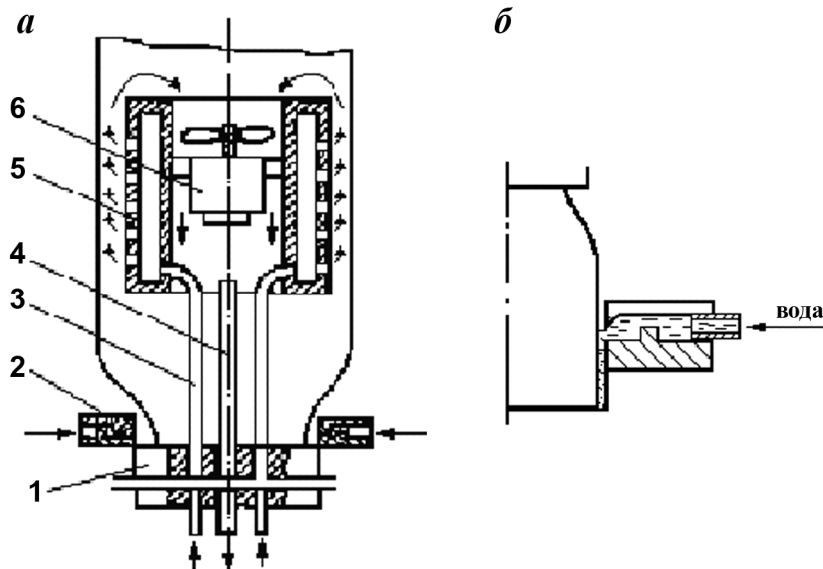


Рис. 4.67. Різновидності охолодження плівки:
а) повітряне – з подачею охолодженого стисненого повітря; б) водяне

Досить ефективним є аерозольне охолодження – у цьому випадку використовують зволене повітря.

Крім викладених вище загальних технологічних проблем при здійсненні технології одержання рукавної плівки потрібно комплексно розв'язувати завдання, які виникають при:

1. роботі екструдера – необхідність рівномірної подачі розтопу з якомога більш однорідними (однаковими), точно встановленими характеристиками;
2. забезпеченні рівномірного (без пульсацій) виходу однорідного, однаково нагрітого розтопу з головки (утворення якісної трубної заготовки);
3. охолодженні рукава – забезпечення рівномірності охолодження;
4. складанні рукава;
5. узгодженості швидкості намотування й екструзії плівки.

Розглянемо стисло реалізацію кожного завдання.

1. Для одержання якісного розтопу з рівномірною його подачею на профільний (формувальний) елемент, як ми вже знаємо, необхідне чітке узгодження роботи трьох зон екструдера, яке встановлюється за допомогою математичного моделювання процесу. Для узгодження роботи всіх зон застосовують:

- добір матеріалу з потрібними (і обов'язково однаковими) реологічними властивостями;
- використання шнека відповідної конструкції для кожного матеріалу, а то й кожної партії;
- встановлення технологічних параметрів екструдуювання залежно від теплофізичних і реологічних характеристик матеріалу;
- дроселювання та фільтрація розтопу на виході з екструдера.

Слід зауважити, що якість труби істотно залежить від гомогенності розтопу, який надходить на головку. Для зміни ступеня гомогенності розтопу на виході з екструдера ставлять дросельний пристрій. При зменшенні перетину каналу в дроселі підвищується тиск у циліндрі (зростає опір), і, відповідно, зростає ступінь гомогенізації (див. розділ 4.4.2.3).

Якість заготовки також значно залежить від характеристики фільтруючого пакета (до речі, це може бути додатковий дросель). Має вплив розмір комірок фільтруючих сіток і кількість останніх. Число сіток визначається залежно від перепаду тиску, який не повинен перевищувати $3 \div 5$ МПа. Розмір комірок бажано брати якомога менший. Найчастіше в практиці використовують сітки з розміром комірок $75 \div 560$ мкм. Кількість комірок тоді становить $6400 \div 144$ шт/см².

2. Для отримання якісного рукава встановлюється оптимальний режим, який повинен забезпечити: рівномірну подачу строго каліброваної заготовки (труби). Адже цілком зрозуміло, що в звичайній, кутовій головці перепад тиску (відповідно напруження зсуву й реологічні характеристики, включаючи саморозігрів) буде різний по кільцю внаслідок відповідних втрат при обтіканні дорна в каналі. Напрями розв'язання цієї проблеми полягають заходах, що передбачають конструювання головок з вирівнюванням потоку, а саме:

- а) змінний перетин каналу між мундштуком (циліндром) і дорном;
- б) s-подібний шлях на вході в головці для вирівнювання потоку розтопу;
- в) виконання на дорні радіальних розподільчих каналів (рис. 4.68);
- г) виконання гвинтових нарізок на дорні і мундштуці, причому гвинтові канали виконані змінного перетину, зрозуміло, з більшим розміром на віддаленому краї кільця від входу розтопу;
- д) головки, у яких дорн або/та мундштук, обертаються назустріч.
- е) використання прямоточних головок – на вертикальних екструдерах, встановлених у напрямку відтягування рукава, чи при горизонтальній схемі екструзії;
- ж) використовують дію вібрації (ультразвуку) на головку. Це сприяє зменшенню дисипативних втрат при течії в каналах головки.

У випадку кутової екструзії внаслідок кутового переходу виникають великі напруження зсуву, і через додатковий опір течії спостерігається більша дисипація енергії, що зумовлює зменшення в'язкості розтопу, зростання швидкості течії, але одночасно можливі деструктивні процеси. Ці явища суттєво зменшуються при обертанні поверхонь, по яких тече розтоп.

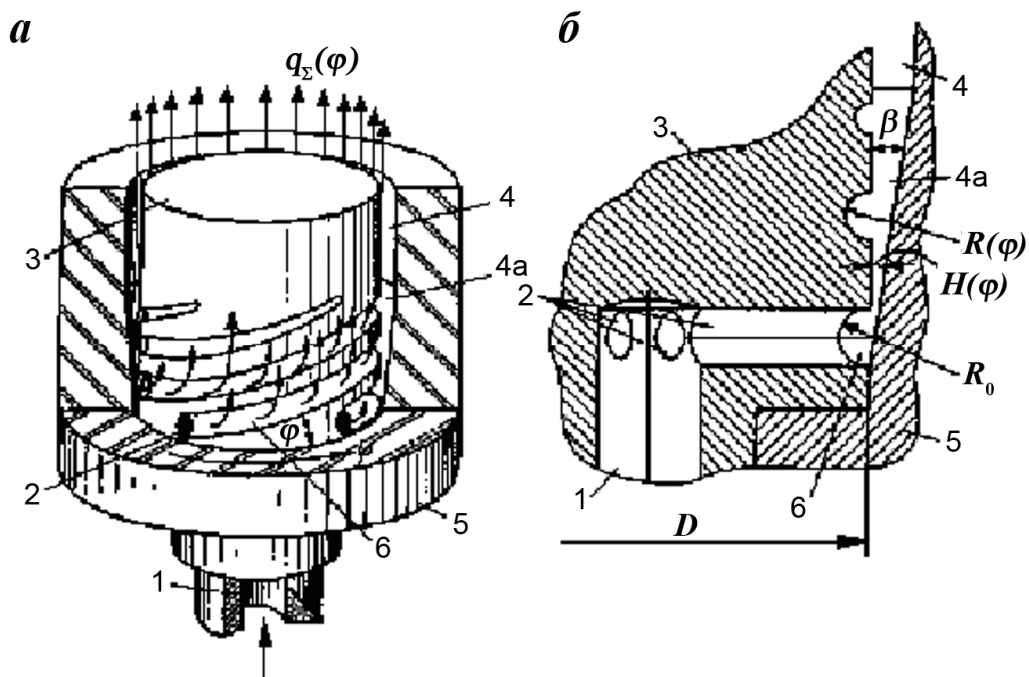


Рис. 4.68. Схема головки з гвинтовими каналами на дорні:

а – загальний вид головки; б – повздовжній розріз каналів головки в радіальному напрямку;
 1 – центральний канал; 2 – радіальні канали; 3 – дорн; 4 – кільцевий канал; 4а – початкова ділянка кільцевого каналу; 5 – корпус головки; 6 – колектор

Довжина формувальної щілини головки впливає, передусім, на мутність плівки. Зі зменшенням довжини каналу напруження зсуву, які виникають на вході в канал при кутовому переході, не встигають релаксувати, що зумовлює так зване періодичне зривання

розтопу на поверхні при виході заготовки (явище еластичної турбулентності) і утворення шорсткої поверхні.

Після виходу заготовки з головки розтоп одночасно піддають роздуванню, витяжці й охолодженню. Швидкість витяжки, рівнотовщинність плівки, її прозорість і фізико-механічні властивості значною мірою залежать від швидкості й рівномірності охолодження. Чим більша швидкість охолодження, тим більша прозорість плівки, бо менша ступінь кристалічності та орієнтаційних напружень.

Суттєвий вплив на якість плівки та її різнотовщинність має рівномірність охолодження рукава – товщина тим більша, чим вища інтенсивність охолодження.

3. Проблеми рівномірності охолодження. Найпоширеніший метод охолодження – обдув повітрям, яке виходить з кільця через отвори. Недолік такого обдування – нерівномірність повітряних потоків з кожного отвору. Для поліпшення обдування використовують:

- кільця з декількома вихідними щілинами замість отворів;
- охолоджуючі муфти з металу, які мають внутрішню поверхню, виконану за профілем, що відповідає профілю рукава. Усередині муфта охолоджується водою, і при контакті з рукавом, внаслідок високої теплопровідності, інтенсифікується процес охолодження разом з поліпшенням рівномірності його через контакт по всій поверхні;
- використання для обдування повітряно-водяної суміші;
- застосування системи водяного охолодження. Особливості цих технічних рішень описані раніше.

4. Проблема складання рукава.

Як видно з рис. 4.69, точки 1 і 2 проходять не однаковий шлях, який можна розрахувати з наступних залежностей:

$$L_3 = 1,15 \cdot L_B, \quad (4.83)$$

$$S_2 = \sqrt{H^2 + \left[R \cdot \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) \right]^2}, \quad (4.84)$$

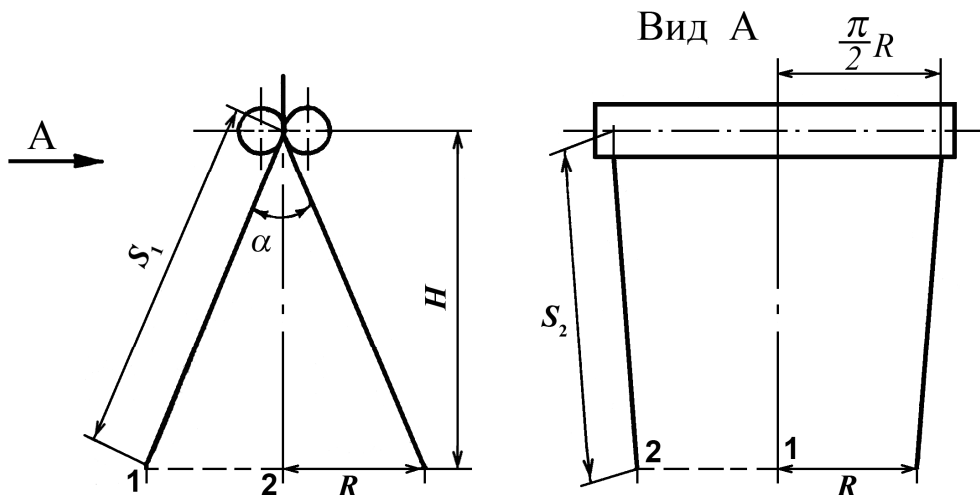


Рис. 4.69. Схема складання рукава

Таке явище викликає утворення складок, які запресовуються і фіксуються на шпулі. Поява складок суттєво залежить від кута розкладу щік. Зі збільшенням кута α співвідношення S_2/S_1 зростає, також зростає імовірність утворення складок. Отже, для запобігання цьому або зменшують α , або щіки роблять випуклими до середини, щоб збільшити S_1 .

5. Утворення складок ще більш імовірно при намотуванні плівки за рахунок:

- а) зміни лінійної швидкості на рулоні через постійне зростання його діаметру, коли окружна швидкість (швидкість обертання рулону) залишається постійною; тому потрібне узгодження v_e і v_n , або імовірність утворення складок зменшується при наявності натягувального пристрою перед намотуванням;
- б) внаслідок термозбігу плівки – зусилля, які виникають при цьому, зморщують плівку;
- в) вигинання від статичної електрики – внаслідок тертя полімеру об щоби, валки і руху в повітрі спостерігається електризація плівки, яка викликає електростатичне відштовхування на рулоні. У такому випадку статичний заряд можна зменшити, зволожуючи повітря, використовуючи нейтралізатори, які іонізують повітря в області естакади, а також, додаючи до сировини антистатика. Часто використовують іонізуюче опромінення УФ-променями, або коронним розрядом;
- г) наявність повітряних конвективних потоків, що зумовлює нерівномірність охолодження рукава і нерівномірність усадки.

При здійсненні технології треба підтримувати умови, які б виключали гойдання рукава (вітер, протяг, теплові конвективні потоки), особливо до лінії кристалізації, бо це призводить до утворення хвилястої поверхні плівки через нерівномірність охолодження і кристалізації. Інколи (крім герметизації ділянки вікон і дверей) добрий ефект дає „капсулювання” рукава (його ховають під прозорий ковпак).

г) Обчислення температурних параметрів рукавної екструзії

Висоту рукава до складання визначають експериментально (за значенням температури липкості), або аналітично. Як ми вже зазначали раніше, формування рукава здійснюється до лінії тверднення (кристалізації) – L_K , упродовж якої спостерігається роздування (n_p), витяжка $n_B = v_n/v_e$ плівки і утворення необхідної надмолекулярної структури в полімері.

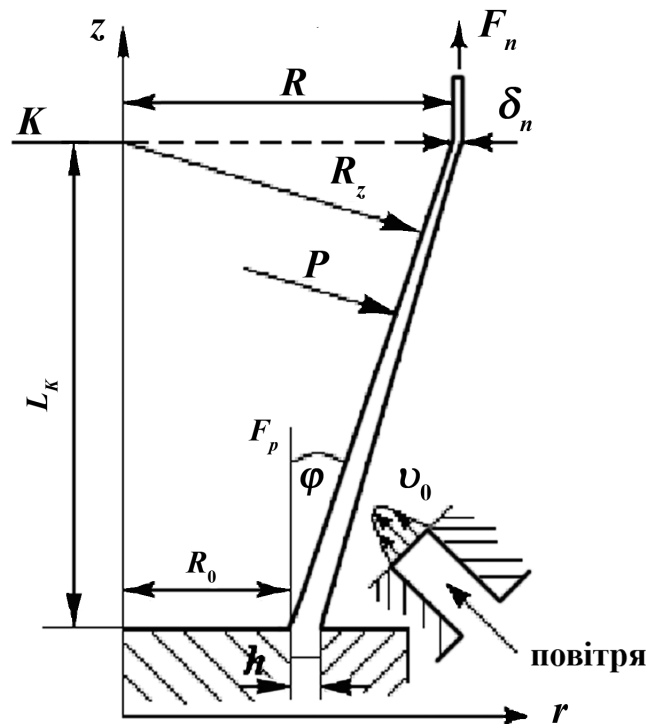


Рис. 4.70. Геометрія рукавної заготовки

Виходячи з того, що висота лінії кристалізації залежить від теплофізичних характеристик розтопу й режиму охолодження, обчислення зводиться до визначення кількості тепла, яке потрібно забрати від розтопу для повного тверднення. Охолодження

здійснюється на ділянці L_k , яку розбивають на нескінченно велику кількість концентричних кілець. Через це теплота, що її втрачає рукав, є сума теплот, які втрачають кільця (тепловий потік):

$$q_a = 2\pi \int_0^{L_k} r_z \cdot \alpha_z \cdot \theta_z \cdot dz, \quad (4.85)$$

Для конічної ділянки – $r_z = R_0 + z \cdot \operatorname{tg} \varphi$,

де: z – віддаль уздовж осі z ; α_z – коефіцієнт тепловіддачі до повітря: $\alpha_z = 3,3 \cdot \nu_0^{1,5}$;

θ_z – різниця температур плівки і повітря:

$$Q_z = (T_{nl} - T_0) + 28,5 \cdot \ln\left(\frac{L_k}{Z}\right), \quad (4.86)$$

де: T_{nl} – температура топлення кристалічної фази або температура текучості.

На лінії K полімер переходить у тверду кристалічну чи аморфну фазу, отже, втрачає кількість тепла, яке дорівнює:

$$q_p = \rho \cdot V \cdot [(T_{nl} - T_0) \cdot c_p - Q_{nl}], \quad (4.87)$$

де: V – об'ємна продуктивність екструдера; T_p – температура розтопу в головці;

Q_{nl} – питома теплота топлення полімеру.

Оскільки теплота, яка забирає повітря, рівна теплоті, яку втрачає полімер до його тверднення, то:

$$\rho \cdot V \cdot [(T_{nl} - T_0) \cdot c_p - Q_{nl}] = 2\pi \int_0^{L_k} r_z \cdot \alpha_z \cdot \theta_z \cdot dz, \quad (4.88)$$

Звідси можемо знайти необхідну об'ємну витрату повітря, знаючи L_k , і навпаки. З балансу можна розрахувати ν_0 (через α_z), T_0 – температуру повітря (через θ_z) і т.д.

Крім лінії тверднення потрібно знайти загальну висоту рукава до складання, адже після тверднення плівка ще досить гаряча, і коли її відразу скласти вона може злипнутись. Тому рукав складають після досягнення температури, нижчої за температуру липкості.

Розрахунок ведуть за тепловим потоком, що передається від плівки до навколишнього повітря вище лінії кристалізації (внаслідок конвекції):

$$q_k = 2\pi \cdot \alpha_o \cdot R_n \cdot L_0 \cdot (T_n - T_0), \quad (4.89)$$

де: L_0 – довжина рукава від лінії кристалізації до щік; T_n – середня температура плівки, що досягається до лінії складання; α_o – коефіцієнт тепловіддачі від полімеру до повітря.

$$T_n \leq T_{\text{липкості}}, \quad (4.90)$$

4.4.3.2. Технологія одержання плоских плівок методом екструзії. Різновидності методу

Процес виготовлення плоскої плівки базується на витисканні розтопу через плоскощілинну формуючу головку з наступним швидким охолодженням. На відміну від рукавних плівок ширина плоских плівок обмежується шириною щілини головки.

За способом охолодження екструдату розрізняють дві технологічні лінії одержання плоских плівок:

1. охолодження на металевих валах повітряно-контактним способом (рис. 4.71);
2. рідинне охолодження – екструзія у водяну баню (рис. 4.72).

У першому випадку розтоп торкається поверхні валу й, переміщуючись разом з поверхнею при обертанні валу, охолоджується. У другому – розтоп потрапляє в холодну рідину й охолоджується, проходячи через неї.

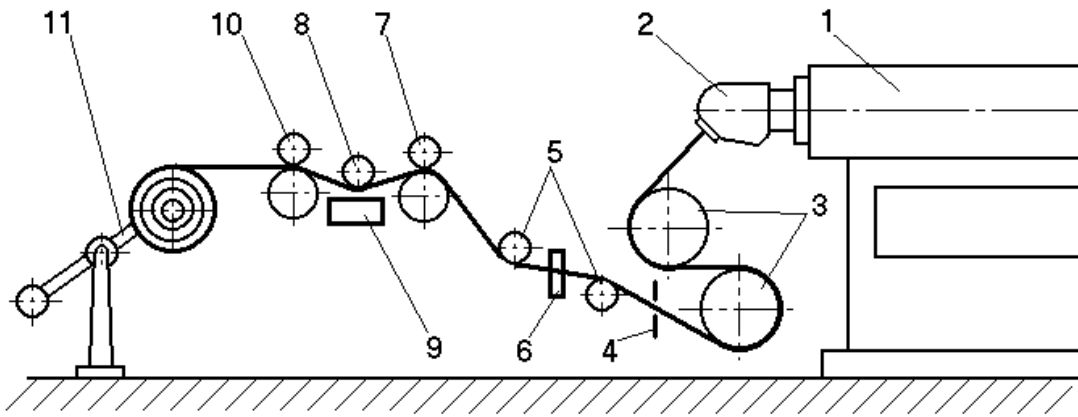


Рис. 4.71. Технологічна лінія для одержання пласкої плівки з охолодженням на валках:

1 – екструдер; 2 – формуюча головка; 3 – приймально-охолоджувальні валки;
4 – пристрій для відтинання кромки; 5 – спрямовуючі валки; 6 – товщиномір; 7 – гляncючі валки;
8 – нагрівний валок; 9 – інфрачервоний нагрівач; 10 – тягові валки; 11 – намотувальний пристрій

При повітряному охолодженні розтоп обливає високополіровану поверхню охолоджуючого валка й за рахунок адгезії транспортується (разом з охолодженням) сумісно з поверхнею, яка обертається. Отже, після контакту з валком плівка не міняє своєї товщини. Товщина формується на проміжку до валка, коли матеріал у в'язкотекучому стані піддається витяжці, зумовленій швидкістю прийому плівки (задається обертанням валків 10) і швидкістю екструзування розтопу.

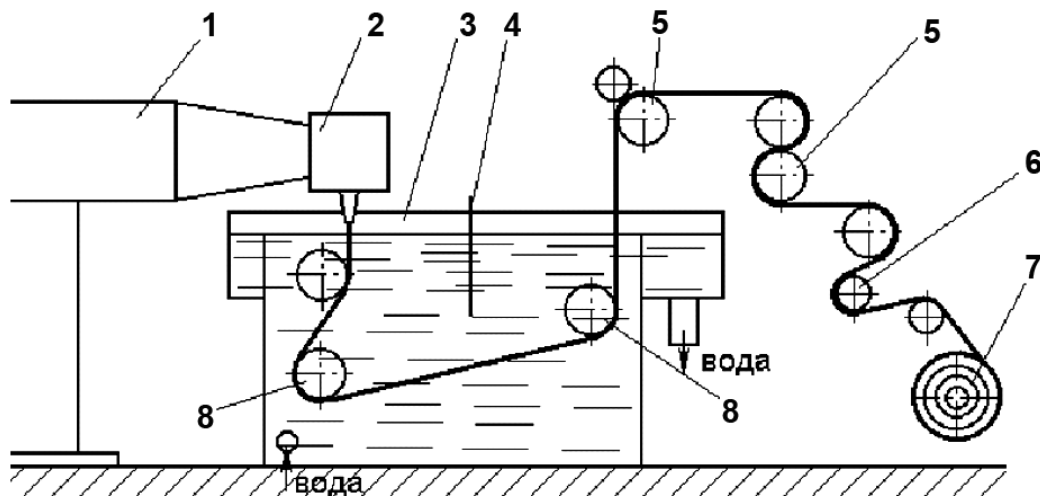


Рис. 4.72. Технологічна лінія одержання пласкої плівки з охолодженням у ванні:

1 – екструдер; 2 – головка; 3 – ванна з водою; 4 – перегородка; 5 – тягові гумовані валки;
6 – компенсатор натягу й спрямовуючі валки; 7 – намотувальник плівки;
8 – система спрямовуючих валків

Як правило, для пласких плівок продуктивність процесу дуже висока, швидкість приймання плівки може досягати 160 м/хв. При великій швидкості екструзування може захоплюватись повітря між розтопом і валком, що призведе до браку: різновтовщинності та мутності. Щоб запобігти цьому, використовують різні способи притискання сформованого полотна до охолоджувального валка в місці контакту. Використовують, наприклад, стиснене повітря, яке виходить з вузької щілини суцільним фронтом і внаслідок надлишкового тиску притискає по дотичній полотню до валка, додатково охолоджуючи його. Замість повітря можна використовувати притискувальні валки (5) (рис. 4.73). У даному випадку, крім притискання, валик служить для додаткового розгладжування плівки по всій довжині валка.

На відміну від рукавної екструзії метод пласкощілинної екструзії дозволяє отримувати плівки високої якості, прозорі, без складок, зі значно вищою, ніж при екструзії з роздувом рукава швидкістю екструзії.

Пласкощілинним методом екструзії отримують плівку шириною до 4,6 м і товщиною від 2 мкм до 600 мкм. Плівки з $\delta = 2 \div 10$ мкм називають ультратонкими, а з $\delta \geq 10$ мкм – товстими.

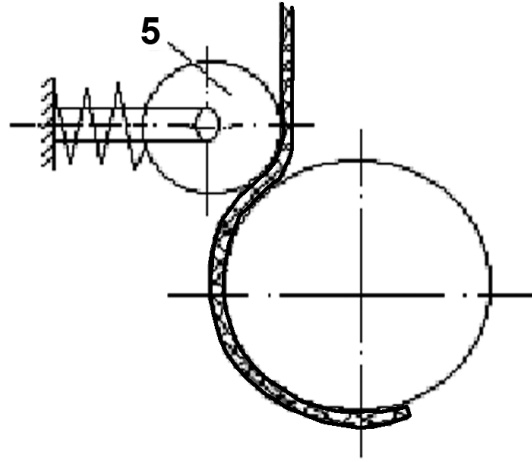


Рис. 4.73. Схема валкового притискання полотна

а) Особливі вимоги при екструзії плаского полотна екструдату

1. Для отримання пласких плівок розтоп, який надходить з матеріального циліндра екструдера, повинен бути максимально гомогенізований (однорідний за реологічними і температурними параметрами в об'ємі), з більшим ступенем фільтрації. Через це для екструзії пласких плівок використовують шнеки з мінімальною глибиною нарізки, підвищеним ступенем стискання й подовженою зоною дозування.
2. Велике значення має рівномірність температури розтопу на виході із циліндра й по ширині головки, оскільки в протилежному випадку екструдуються потоки з різною в'язкістю, що є причиною різновтовщинності плівки й анізотропії властивостей внаслідок різних: а) швидкостей течії, б) орієнтаційних напружень і в) швидкості кристалізації.

Вирівнювання температури при екструзії здійснюється завдяки інтенсивній циркуляції розтопу в зоні дозування і підвищення опору на виході із циліндра, викликаного при течії розтопу крізь великий пакет тонких сіток (фільтр) і в щілині головки. Строго контролюється температура нагрівачів по всій ширині головки.

3. При екструзії пласка плівка відводиться з підвищеною швидкістю, через це розтоп у щілині зазнає великих напружень зсуву при забезпеченні необхідної швидкості течії (v_e), адже існує залежність:

$$\tau = \eta \cdot \bar{\gamma}^n, \quad \text{де } \bar{\gamma} = \frac{\partial v_e}{\partial h}, \quad (4.91)$$

де: τ і $\bar{\gamma}$ – напруження та швидкість зсуву; η – коефіцієнт в'язкості; h – висота щілини.

Цілком зрозуміло, що v_e , і, отже, напруження зсуву технологічно можна збільшити, збільшивши перепад тиску в головці, який може виявитись надто великим для досягнення необхідної v_e , яка закономірно підвищить τ . Крім цього v_e суттєво може вплинути на продуктивність екструдера і не завжди може бути здійсненою через надмірно високі напруження зсуву, які виникають при цьому. У зв'язку із цим для зменшення перепаду тиску і забезпечення релаксації напружень (зменшення τ) процес ведуть при максимально підвищеній температурі (обмежується термостійкістю). Зрозуміло, що в такому випадку

зменшується в'язкість розтопу (η) і тому досягається менше значення τ при досягненні необхідного значення v_e . Крім цього, підвищення температури сприяє утворенню більш прозорих плівок, оскільки при швидкому охолодженні сформованого полотна з розтопу утворюється менш упорядкована (аморфізована) надмолекулярна структура полімеру з меншою концентрацією внутрішніх напружень.

З метою зменшення тиску в головці висота екструзійної щілини значно більша, ніж товщина плівки, тому на виході із щілини розтоп зазнає великої витяжки яка сприяє появи орієнтаційних напружень.

б) Проблеми формування полотна пласкої плівки

Екструзія пласких плівок здійснюється з використанням колекторних головок. Наявність у головці колектора дає змогу усунути можливі пульсації розтопу й розподілити його рівномірно по всій ширині головки з рівними параметрами (рис. 4.74).

Розтоп після пакету сіток через перехідник надходить у колектор, де розтікається по всій ширині головки й, внаслідок додатного перепаду тиску, екструдується через щілину у вигляді полотна. Товщину екструдованого полотна розтопу регулюють рухомою губкою (3). Однак розтоп надходить у щілину з неоднаковим перепадом тиску по ширині в зв'язку з різним шляхом протікання по колектору і тому – з різними втратами тиску. По центру колектора розтоп проходить найменший шлях (від перехідника до щілини), отже, тут будуть найменші втрати тиску на течію. З віддаленням від центру (місця виходу розтопу з перехідника) втрати зростають на перемагання опору перетікання по колектору. Внаслідок різних втрат тиску по ширині головки, на вході з екструдера і до краю колектора, виникає різний перепад тиску, що зумовлює різний вихід матеріалу із щілини, а, отже, можлива різнотовщинність плівки по ширині полотна.

Ця проблема зростає з підвищенням в'язкості розтопу. Для вирівнювання потоку найчастіше використовують вкладки (10), які по центру найбільше наближаються до нижньої плити, а по краю є найвіддаленішими. Крім цього, рухому губку виконують з еластичного металу, що дозволяє сформувати аналогічний профіль щілини внаслідок вигинання губки залежно від тиску в розтопі.

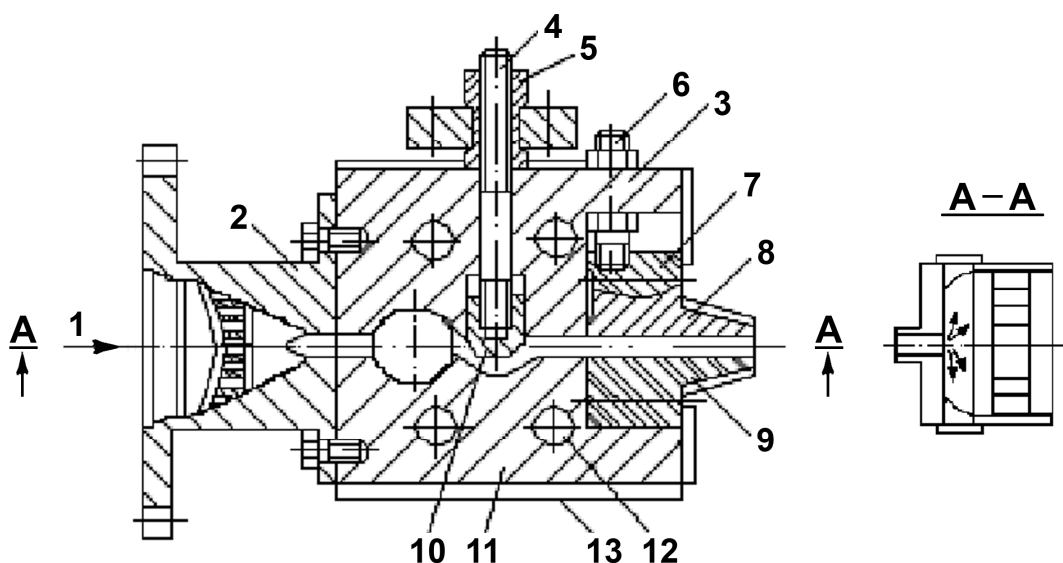


Рис. 4.74. Схема пласкощілинної головки:

- 1 – напрям потоку; 2 – перехідник з фільтром; 3, 11 – верхня й нижня плити;
4 – регульовальний сердечник; 5 – соленоїдна котушка; 6 – регульовальний гвинт;
7, 10 – рухомі вкладки; 8 – рухома губка; 9 – нерухома губка; 12 – нагрівники; 13 – теплоізоляція.

Профіль щілини в сучасних технологіях розраховують на ЕОМ з використанням даних товщини за шириною плівки, швидкістю прийому, температурних та реологічних характеристик розтопу. За допомогою ЕОМ відбувається регулювання профілю (дистанційно). У цьому випадку замість регулювальних гвинтів (6) використовують терморегулятори, які лінійно видовжуються при подаванні на них струму, приклад такого виробництва – технологічна лінія одержання поліпропіленової плоскої плівки на Луцькому заводі пластмасових виробів „Хемосвіт”.

При виробництві плівки з полімеру з підвищеною в'язкістю використовують головки з допоміжним шнеком у колекторі з двоспрямованою нарізкою (рис. 4.75).

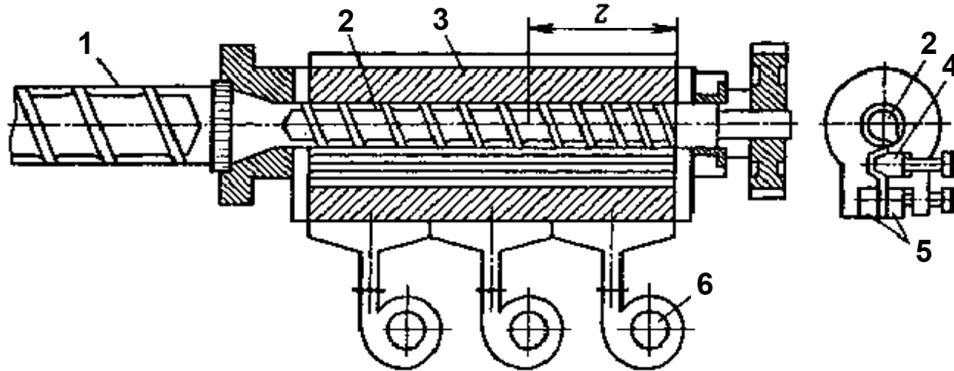


Рис. 4.75. Конструкція головки з розподільчим шнеком у колекторі:
1 – екструдер; 2 – розподільчий пристрій; 3 – корпус головки; 4 – підпірна планка;
5 – формувальні губки; 6 – вентилятор теплового регулювання головки

Доброго ефекту рівномірності розподілу тиску по ширині головки досягається в головках зі складним профілем типу „риб'ячий хвіст” (рис. 4.76).

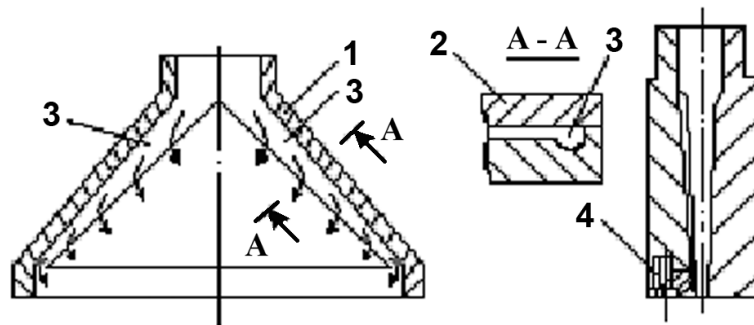


Рис. 4.76. Щілинна головка з двома колекторами (типу „риб'ячий хвіст”):
1 – нижня плита; 2 – верхня плита; 3 – колектори; 4 – рухома губка

При екструзії низьков'язких розтопів інколи достатньо регулювання профілю за допомогою еластичної нижньої губки (діафрагми).

Часткове вирівнювання потоку по ширині щілини відбувається також внаслідок встановлення різної температури по ширині головки (адже головка нагрівається). Однак, у цьому випадку необхідна повна корекція з в'язкістю розтопу, бо недотримання її по ширині у відповідних межах може призвести до течії з різною швидкістю, і тому можлива ще відчутніша різнотовщинність. Зміна температури може спричинити різний ступінь орієнтації.

в) Проблеми охолодження полотна

При охолодженні йде процес склування чи кристалізації. Крім того внаслідок значної витяжки в розтопі відбувається відповідна орієнтація полімеру. Отже, режим охолодження

значною мірою визначає надмолекулярну структуру полімеру і властивості плівки, виготовленої на його основі.

При повітряно-контактному способі можуть виникнути такі проблеми:

1. захоплення повітря під плівку (швидкість прийому полотна більша, ніж 50 м/хв.) – поява різнотовщинності і мутності;
2. різна температура з боку валка і зовнішнього повітря: можливе нерівномірне охолодження, що може викликати плямистість, вигинання;
3. при великому зусиллі притискання та, внаслідок цього, напливи на валках, особливо, коли розтоп з низькою в'язкістю.

При рідинному охолодженні значно зростає ефективність охолодження і його рівномірність. Однак, при такому охолодженні можливе:

1. збільшення анізотропії властивостей (міцності) плівки, оскільки часткова витяжка відбувається вже при нижчій температурі відразу при вході в ванну ($T_{води} = 50 \div 70$ °С). І до повного застигання в ванні спостерігається безперервна витяжка при зростанні в'язкості, що призводить до значної фіксації орієнтаційних напружень у напрямку витяжки. В першому випадку витяжка відбувається до контакту розтопу полімеру з поверхнею валка;
2. хвилювання рідини внаслідок великої швидкості руху плівки викликають нерівномірну товщину плівки по довжині. Для зменшення цього впливу ставлять у ванну щити, що гасять хвилі, а ванну встановлюють на амортизатори.

г) Вплив технологічних параметрів на процес формування плівки

На процес формування полотна і властивості плівки значний вплив мають температура розтопу, який входить у щілину головки, швидкість охолодження, відстань від головки до охолоджуючого елементу, швидкість відведення плівки і реологічні характеристики розтопу.

Температура розтопу

Як правило, чим вища температура розтопу, тим менша мутність плівки, більший блиск поверхні, що зумовлено більшим перепадом температур при охолодженні і внаслідок цього – зменшенням внутрішніх напружень упорядкування в надмолекулярній структурі (склування).

Як відомо, міцність плівки залежить від ступеня кристалічності та орієнтації макромолекулярних угруповань. При підвищенні температури розтопу зменшується ступінь кристалічності і орієнтація в напрямку витяжки розтопу (бо нижча в'язкість). Крім цього, зменшується напруження зсуву, бо більш швидкою є їх релаксація при течії в щілині. І при екструзії плівки без глибокої витяжки і додаткової орієнтації плівка відзначається ізотропними властивостями з пониженою міцністю.

На сьогоднішній день досить поширеним стає процес формування ультратонких плівок. При їх формуванні використовують глибоку витяжку розтопу, бо зміною висоти щілини не можна сформувати таку малу товщину через надмірне зростання опору головки. При таких умовах можливе виникнення орієнтація полімеру в напрямку витяжки, що призведе до анізотропії міцності плівки (у поздовжньому напрямку вона значно міцніша, ніж у поперечному). У зв'язку з цим для зменшення анізотропії властивостей плівки її формують при максимально підвищеній (критичній) температурі.

Приклад температурного градієнту при екструзії плоских плівок:

ПЕВГ	$T_u = 200 \rightarrow 240$ °С	$T_z = 250$ °С
ПП	$T_u = 210 \rightarrow 250$ °С	$T_z = (265 \pm 10)$ °С

Тут T_u і T_z температура циліндра екструдера та екструзійної головки, відповідно.

Орієнтовні режими екструзії пласких плівок з поліолефінів

Термопласт	Температура циліндра по зонах, °С				Температура головки по зонах, °С		Тиск у головці, МПа
	1	2	3	4	1	2	
ПЕНГ	140	160	170	195	210	210	5 ÷ 12
ПЕВГ	170	190	200	210	230	230	8 ÷ 15
ПП	190	235	255	260	265	265	10 ÷ 20

Швидкість охолодження

На якість плівки впливає температура охолодження і швидкість охолодження плівки. Швидкість охолодження залежить як від перепаду $\Delta = T_{\text{розтопу}} - T_{\text{валка}}$, так і від відстані валка від головки.

Чим нижча температура валка ($T_{\text{охол}}$) і більше значення Δ , тим менший ступінь упорядкування макромолекул, і тому кращі оптичні властивості. Однак при дуже низькій температурі охолодження кристалічних полімерів можливе вигинання плівки, мікротріщини на поверхні („срібло”).

Відстань валка від головки, як правило, дорівнює 0,1 ÷ 0,7 м і впливає на швидкість витяжки розтопу (тобто швидкість відведення плівки) обернено пропорційно: чим менша віддаль до моменту контакту з поверхнею валка (початком охолодження) тим з більшою швидкістю треба витягувати розтоп, щоб забезпечити необхідну товщину полотна. А це, в свою чергу, призведе до зменшення мутності плівки і підвищення її міцності в напрямку екструзування (особливо коли переробляють кристалічний полімер).

Вплив температури охолоджуючого валка на деформаційно-міцносні властивості можна простежити за графіком однотипної залежності, рис. 4.77.

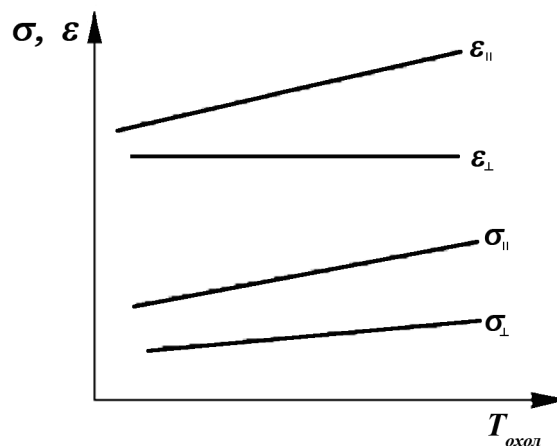


Рис. 4.77. Залежність фізико-механічних властивостей плівки від температури охолодження:

ε_{\perp} і $\varepsilon_{||}$ – відповідно видовження при розриві уперек і вздовж напрямку витяжки;

σ_{\perp} і $\sigma_{||}$ – максимальне напруження при розтягу уперек і вздовж витяжки

д) Переваги та недоліки методу екструзії пласкої плівки

Переваги методу:

1. Висока продуктивність процесу (до 160 м/хв.);
2. Висока прозорість і поверхневий блиск плівки;
3. Відсутність злипання;
4. Зручність контролю товщини плівки;

5. Спрощення способу намотування і, як наслідок, менша імовірність утворення складок;
6. Можливість безпосереднього дублювання матеріалів;
7. Можливість виготовлення плівок з низьков'язких розтопів (ПА), оскільки існує можливість швидкого охолодження.

Недоліки методу:

1. Неможливість виготовлення плівок великої ширини (ширина обмежується шириною головки);
2. Великі відходи через відрізання кромки, які потрібно переробляти перед повторним використанням, на що потрібні великі енерговитрати і додаткове обладнання;
3. Необхідність орієнтації для підвищення міцності плівки;
4. Жорсткі (підвищені) вимоги до реологічних характеристик та однорідності розтопу.

4.4.3.3. Переробка відходів при екструзії плівки

Відходи при виробництві плоских плівок надходять на ножові дробарки, де подрібнюються (нарізаються) на дрібні (5 ÷ 7 мм) шматки. Цей продукт пневмотранспортом подають на очистку від порохи, механічних включень і металевих стружок промиванням або продуванням з магнітною сепарацією, після чого направляють у силосні ємності, з яких їх послідовно дозують у агломератор, а потім – на лінію грануляції. Отримані гранули повертають в основне виробництво.

Слід зауважити, що внаслідок жорстких вимог до якості розтопу, велику увагу приділяють підготовці основної сировини – додатковому очищенню обдуванням, надійному сушінню і чіткому дозуванню.

4.4.3.4. Орієнтація плівок

Ця операція здійснюється глибокою витяжкою плівки при температурі вище температури склування у поздовжньому, або в обох напрямках для підвищення фізико-механічних властивостей.

При орієнтації значно зростає модуль пружності плівки і розривне напруження в напрямку витяжки. Одночасно поліпшуються оптичні властивості: світлопропускання, з'являється глянець на поверхні.

Під час орієнтації відбуваються процеси, які супроводжуються спрямленням макроланцюгів у напрямку дії сили при розтягу, орієнтацією і деформацією (видовженням) кристалічних структур. Ці зміни фіксуються внаслідок швидкого наростання в'язкості (швидкого охолодження). Все це зумовлює появу ще однієї властивості плівки – здатності до термозбіжності (скорочення при нагріванні). Цю здатність використовують для пакування. Поздовжня орієнтація здійснюється найчастіше валковими засобами (рис. 4.78).

Орієнтація характеризується коефіцієнтом витяжки:

$$K_B = \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad (4.92)$$

де: ω_2 , ω_1 – кутові швидкості тягових і подавальних валків.

Для нагріву використовують інфрачервоне опромінення, або печі тунельного типу. Орієнтація здійснюється на шляху (l_{op}) за рахунок більшої швидкості обертання валків (4), ніж (1) (рис. 4.78).

У поперечному напрямку витяжку, як правило, здійснюють одночасно з поздовжньою (двоосна орієнтація) на ширильних машинах. Ширильний пристрій – неперервний конвеєр із спеціальними роликками – захоплювачами (клубами). Принципова схема двоосної орієнтації наведена на рис. 4.79.

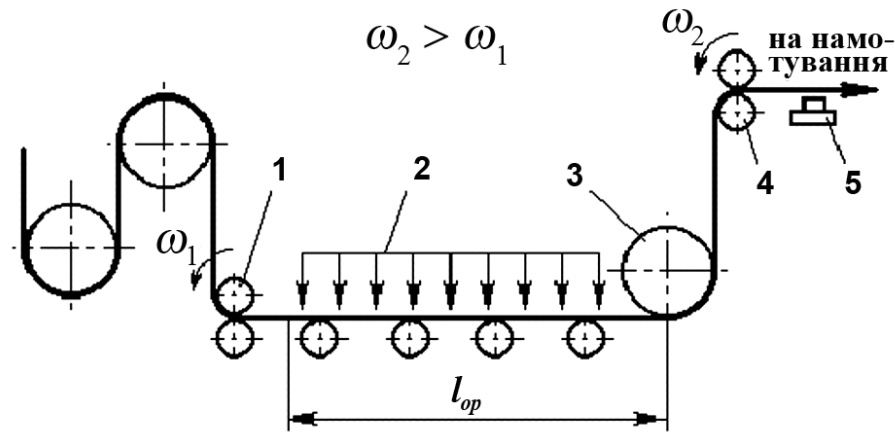


Рис. 4.78. Схема лінії поздовжньої орієнтації:

1 – приймальні валки (подавальні); 2 – нагрівний пристрій; 3 – охолоджувальний валок;
4 – тягові валки; 5 – датчик товщини

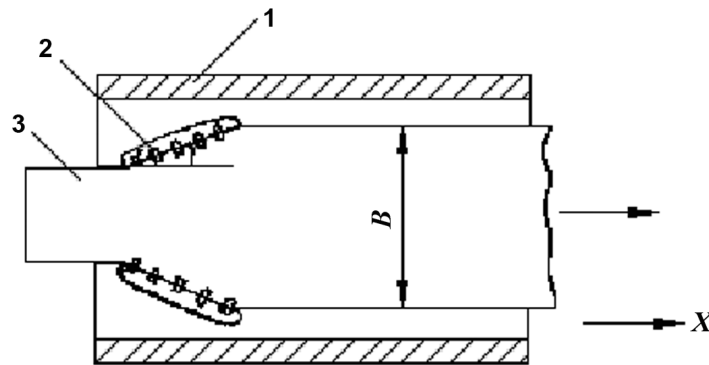


Рис. 4.79. Схема двоосної орієнтації

1 – тунельна піч; 2 – ширильний пристрій; 3 – плівка

Застосовуючи такий метод, отримують ізотропні плівки з підвищеною міцністю.

Швидкість поздовжньої витяжки дорівнює:

$$\bar{\varepsilon}_B = \frac{(\omega_2 - \omega_1)}{l_{op}} \quad (4.93)$$

При поперечній витяжці швидкість залежить від швидкості руху плівки і кута розміщення ширильних пристосувань (α):

$$\bar{\varepsilon}_{II} = \frac{dv_x}{dx} = \frac{2 \cdot \omega_2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{B} \quad (4.94)$$

де: B – ширина плівки.

Якість плівки визначається ступенем витяжки, який визначається як:

$$f = 0,5 \cdot (3 \cos^2 \alpha - 1), \quad (4.95)$$

при $f = 1$ – ідеальна орієнтація, а при $f = 0$ – неорієнтований матеріал. Коефіцієнт f залежить від K_B і для ПЕВГ, наприклад, при 60°C f_{\max} досягається при $K_B \geq 5$.

Умовами одержання максимальної орієнтації в плівці є: якомога більш низька температура (бажано, щоб вона наближалась до температури склування); найбільша швидкість витяжки, максимальний ступінь витяжки при постійних значеннях температури і швидкості; фіксація структури після витяжки.

Спосіб фіксації структури після витяжки визначається природою полімеру. В плівках з аморфних полімерів зниження температури нижче від температури склування полімеру зберігає орієнтовану структуру. В плівках з кристалічних полімерів орієнтацію закріплюють

термофіксацією, тобто нагріванням до температури, дещо меншої за температуру топлення полімеру, при якій відбувається релаксація напружень і фіксація структури полімеру. Термофіксація знижує здатність плівки до усадки, розширює температурний інтервал її експлуатації, поліпшує механічні властивості.

Основні технологічні параметри процесу одержання орієнтованих плівок – кратність витяжки, а також швидкість і температура витяжки.

Кратність витяжки – відношення розмірів сітки чи кола, нанесених на плівку, після витяжки до початкових розмірів. Кратність витяжки для різних полімерів становить: ПП – 10 : 1; ПВХ – 4 : 1; ПС – 5 : 1; ПЕТФ – 4 : 1; ПА – 3,5 : 1.

Чим більша кратність витяжки, тим вищою є міцність при розтягу, але тим нижчим – відносно видовження при розриві. Тобто еластичність матеріалу після витяжки зменшується. Верхня межа кратності витяжки – це таке її значення, при якому створюється небезпека розриву плівки.

Як зазначалося, швидкість витяжки – відносна деформація плівки в одиницю часу.

Температура витяжки визначається природою термопласту. З підвищенням температури витяжки знижуються напруження орієнтації і полегшується досягнення високої кратності витяжки. Підвищення температури витяжки зменшує також анізотропію властивостей плівки. Але наближення температури витяжки до температури текучості полімеру може спричинити розрив плівки чи „заплавлення” захоплювачів (крупів). Витяжку плівок проводять при таких орієнтовних температурах (°C): ПЕНГ – 90 ÷ 105; ПП – 140 ÷ 160; ПВХ – 80 ÷ 120; ПС – 100 ÷ 130; ПЕТФ – 80 ÷ 130.

Як згадувалося, орієнтація має суттєвий вплив на деформаційно-міцнісні характеристики плівки. Приклад змін цих властивостей для поліетиленової плівки (з ПЕВГ) зображено на рис. 4.80.

Вплив орієнтації на фізико-механічні властивості залежить від типу полімеру. Коли для еластичних полімерів (ПЕ, ПУ) при зростанні міцності зменшується максимальне видовження в напрямку орієнтації, то для штивних полімерів (ПС, ПММА, поліакрилати, стироли) разом з міцністю зростає і максимальне видовження. При орієнтації зростає ударна в'язкість і стійкість до розтріскування полімеру. Це збільшення спостерігається у напрямку орієнтації. Отже, при двоосній орієнтації стійкість до удару і розтріскування зростає в обох напрямках.

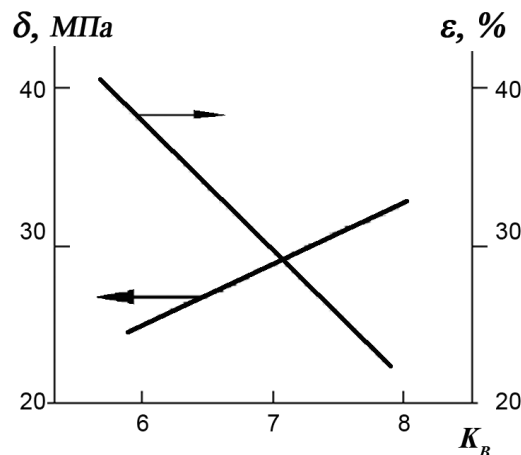


Рис.4.80. Залежність фізико-механічних властивостей в напрямку витяжки плівки на основі ПЕВГ від коефіцієнту витяжки

Збільшення міцності, ударної в'язкості залежить від температури та швидкості орієнтації. З підвищенням температури витяжки міцність і ударна в'язкість стають меншими,

а видовження більшим, ніж при витяжці в умовах нижчих температур. Це пояснюється релаксацією орієнтаційних напружень при високій температурі.

З підвищенням швидкості витяжки зростає міцність в осьовому напрямку в більшій мірі, ніж в поперечному.

Температура охолодження впливає як на міцнісні характеристики плівки так і на максимальний ступінь витяжки (рис. 4.81).

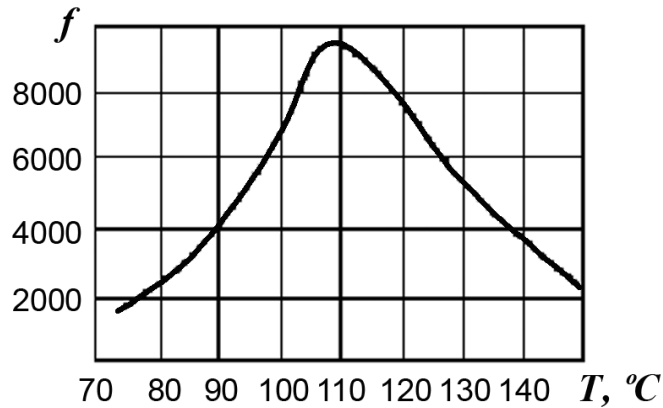


Рис. 4.81. Вплив температури формування на ступінь максимальної витяжки зразка з листового ударотривкого полістиролу

Операції орієнтації піддаються всі полімери, для котрих $T_c > T_{\text{кім}}$. У протилежному випадку спостерігатиметься релаксація досягнутої деформації в часі після орієнтації.

Окремий випадок орієнтації – одержання полімерних ниток, які утворені з мікрОВОЛОКОН (ниток), коли внаслідок глибокої витяжки прутка спостерігаються спрямлення макромолекул і суттєве видовження надмолекулярних кристалічних структур, які утворюють, внаслідок цього окремі моноволокна (наприклад, поліпропіленові, полістирольні нитки).

г) Нетрадиційні методи практичного використання процесу орієнтації полімерів при формуванні виробів

Гідростатична і плунжерна екструзія

Цими методами можна одержати вироби, які обмежені довжиною (дискретні вироби) за допомогою способу перетискання через формувальний циліндр. Це періодичні процеси, які відрізняються між собою тим, що при гідростатичній екструзії використовується проміжна речовина – мастильний шар (мастило), а плунжерна екструзія здійснюється без нього. В обох випадках процес відбувається при температурі, яка близька до температури топлення полімеру.

Принцип плунжерної екструзії відображений схематично на рис. 4.82. Полімерна заготовка (1) подається в формувальний циліндр (2), який нагрівається і оснащений профільною фільєрою для надання необхідної форми виробу (3). В циліндр також завантажуються легкотопкі зтопи металів або ж легкотопкий полімер (з низькою температурою топлення). Після нагрівання до потрібної температури на рідке мастило (розтоп металу) діють плунжером (5). Створюється тиск, під дією якого полімерна заготовка спочатку ущільнюється, деформується, а потім перетискається через формувальний отвір філь'єри. Для плунжерної екструзії розвивається тиск $250 \div 300$ МПа, а для гідростатичної – $100 \div 150$ МПа.

При цьому розвиваються великі напруження зсуву, які сприяють спрямленню і орієнтації макроланцюгів в напрямку дії тиску (переміщення заготовки). Після виходу з

філь'ери матеріал різко охолоджується, внаслідок чого в полімері під час переходу у склоподібний, кристалічний чи аморфний стан фіксується досягнутий високоорієнтований стан. Отже, формування виробу відбувається в полімері, коли він знаходиться в високоеластичному (твердому агрегатному) стані. Температура екструзії завжди нижча за температуру топлення чи текучості полімеру. При цьому треба завжди враховувати саморозігрівання заготовки внаслідок дисипації енергії від втрат тиску на тертя. Так для поліетилену високої густини температура формування не повинна перевищувати $105 \div 120^\circ\text{C}$ (коли $T_m = 125 \div 130^\circ\text{C}$).

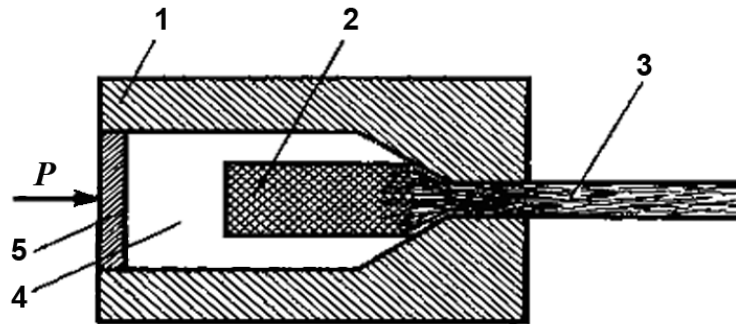


Рис. 4.82. Схема гідростатичної екструзії полімеру:

1 – формуючий циліндр; 2 – полімер-заготовка; 3 – виріб з орієнтованою структурою;
4 – мастило; 5 – плунжер

На фізико-механічні властивості виробу і його якість має також вплив швидкість перетискання.

При правильному підборі швидкості екструзії, температурного режиму та профілю філь'ери вдається одержати профільні вироби з ПЕ, які мають міцність на розтяг у повздовжньому напрямку $400 \div 600$ МПа. Такі значення міцності досягаються при найвищих ступенях витяжки і є граничними для даного способу. Ступінь витяжки в значній мірі впливає на тиск формування. Із збільшенням ступеню витяжки тиск зростає у степеневій функції.

З іншого боку існує мінімальне значення тиску, при якому спостерігається орієнтація у полімері. Так, для поліетилену мінімальне значення тиску, при якому макромолекули починають ковзати і спрямляться, є таким, при якому напруження зсуву, що виникає при цьому, дорівнює 15 ± 1 МПа.

Деформація полімеру є однорідною (гомогенною), супроводжується без утворення “шийки”, при цьому способом можна досягнути високого ступеня витяжки.

Підвищення тиску формування при низькотемпературній екструзії сприяє зростанню міцності виробу і є, при цьому, чинником до збільшення видовження при розриві, тобто забезпечує високу витяжку. Навіть тоді, коли ступінь витяжки при низькотемпературній екструзії і при звичайній орієнтації при розтягуванні є однаковий, то міцність плунжерно - екструдованих зразків може виявитись вищою. Це обумовлено тим, що під час перетискання через формувальний отвір відбувається крім орієнтації ще і “заліковування” дефектів структури, таких як пори, тріщини тощо, і при цьому запобігається утворення дефектів такого типу внаслідок ущільнюючої дії гідростатичного тиску, який діє на заготовку з трьох сторін.

Недоліком цього методу є те, що одержані вироби відзначаються високою анізотропією фізико-механічних властивостей. Міцність виробу при розтягу в перпендикулярному до орієнтації напрямку є значно нижчою, ніж досягнута міцність у повздовжньому напрямку. Саме тому екструдовані при низькій температурі вироби легко розщеплюються (розшаровуються) при розтягуванні чи стисканні їх в поперечному напрямку. Оптимальні

властивості подібні вироби мають тоді, коли повністю спрямлено до 50 % макромолекул, а решта пов'язані між собою фізичними силами та петлями зачеплень у загальному об'ємі полімеру. Для високоорієнтованих полімерів зростає здатність до повзучості. Під дією зусилля на орієнтований зразок вздовж укладених спрямлених ланцюгів спостерігається ефект повзучості (незворотного переміщення ланцюгів) із зростанням розмірів зразку при навантаженнях значно менших, ніж максимальне навантаження при розриві.

Формування виробів з високим ступенем орієнтації полімеру досягається в умовах, які забезпечують орієнтацію ланцюгів при витяжці з розтопу чи з розчину.

На ефект орієнтації при виготовленні полімерних погонажних виробів плунжерною екструзією “на холоді” (при кімнатній, чи значно нижчій, ніж температура топлення температури) базується принцип реінтрансії полімерних труб з поліетилену, які використовуються для футерування внутрішніх стінок металевих трубопроводів (водотягів, систем каналізації, газоводів, тощо) під час їх ремонту при старінні, чи при ушкодженні.

Цей принцип полягає у тому, що при кімнатній температурі призначена для футерування поліетиленова труба протягується з відповідним зусиллям і з певною швидкістю через металеву муфту з конусоподібним отвором в сторону меншої основи (рис.4.83). Кут конусності в межах від 12 до 17°. Діаметр більшої основи конуса близький до діаметру вихідної труби.

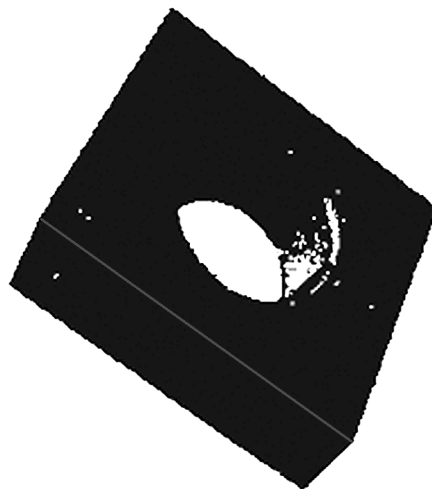


Рис. 4.83. Формувальний профіль для протягування труб

Під час протягування в стінках труби виникають великі орієнтаційні ефекти в напрямку дії сили, а також виникає деформація вимушеної еластичності в радіальному напрямку внаслідок зменшення діаметру на виході муфти і просуванню труби вздовж конусної стінки. Конусність викликає радіальне орієнтаційне напруження.

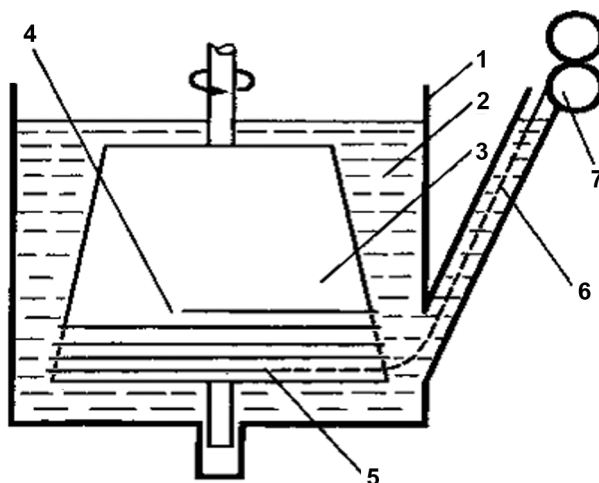
Внаслідок радіальної орієнтації, яка виникає при вимушеній еластичності, зменшується діаметр труби і збільшується її довжина. Труба легко входить у відновлюваний металевий трубопровід. А після її встановлення здійснюють підігрівання зсередини гарячим повітрям, чи парою до температури проявлення великих високоеластичних деформацій. Труба скорочується і під дією радіальних орієнтаційних напружень збільшується в діаметрі, за рахунок чого щільно прилягає до трубопровідної труби.

В цьому процесі важливе значення має швидкість протягування і кут конусності муфти. Швидкість може змінюватись залежно від товщини стінки труби від 100 до 600 мм/хв. Товщина стінки труби може бути від 5 до 20 мм, яка, як відомо залежить від діаметру труби і вихідного матеріалу.

Орієнтація макромолекул при деформації з розчину полімеру

Слід зауважити, що чим більша кількість зачеплень, складок та перегинів макромолекул (дефектів структури) після орієнтації полімеру, тим нижча механічна міцність виробу.

Тому для одержання орієнтованого стану полімеру з мінімальною кількістю дефектів в структурі використовують для формування його розчини. Чим більш розбавлений розчин, тим менше дефектів внаслідок зменшення зачеплень макроланцюгів. Так, поліетилен розчиняють в ксилолі до концентрації 0,5 % мас. З цього розчину потрібно одержати плівку чи нитку внаслідок випаровування розчинника і керованої кристалізації полімеру (керованого укладання ланцюгів). Формування здійснюється на пристрої, схематичне зображення якого подане на рис. 4.84.



*Рис. 4.84. Схема установки для одержання плоского волокна – плівки з розчину полімеру:
1 – емність; 2 – розчин полімеру; 3 – ротор (тефлоновий); 4 – місце росту волокна-плівки;
5 – кристал-затравка; 6 – волокно-плівка; 7 – витяжний пристрій*

Основною діючою частиною пристрою є центральний конічний циліндр – ротор (3) з фторопластовим покриттям на поверхні. Наростання нитки (плівки) розпочинається в будь-якому місці поверхні (4) ротора – це зародок. Нитку - зародок опускають в розчин так, щоб вона доторкнулась конічної поверхні ротора. В цей момент відбувається ініціювання росту нитки з розчину за рахунок орієнтаційної кристалізації. Місце (5), де нитка твердне за рахунок кристалізації, є місцем відбирання (відтягування) нитки (6), яке здійснюється за допомогою тягового пристрою (валків 7). Для проведення процесу у неперервному режимі необхідно підібрати відповідні температуру і швидкість відведення з урахуванням концентрації, при яких швидкість кристалізації зростання нитки узгоджується з швидкістю її відведення. Подальше обертання циліндра призводить до орієнтації ланцюгів в полімері з одночасною кристалізацією. Міцність утворених монокристалів надзвичайно велика. Швидкість наростання нитки та кристалізації полімеру підвищується зі збільшенням концентрації розчину, швидкості обертання та при зростанні температури розчину. Для поліетиленових розчинів температуру витримують в межах $96 \div 118$ °С при швидкості відтягування нитки 0,6 см/хв. Надмолекулярна структура полімеру в утвореній нитці складається, в основному, з кристалітів типу “шиш-кебаб” з поперечним перерізом центральної частини в межах 100 Å. Таким чином, одержаний виріб за рахунок течії розчину відносно циліндра, який обертається, є не гладка нитка, а орієнтоване центральне волокно, що покрите макромолекулярними наростами. Ці нарости не протидіють напруженню при розтягуванні. Частка наростів зменшується при підвищенні температури розчину: для поліетилену критична температура не повинна перевищувати 112 ± 1 °С. Модуль пружності

відформованих волокон не є максимальним і досягає величини 50 000 МПа. Але після багатократних промивань нитки з метою видалення залишків розчинника та утворених наростів вдається отримати гладку нитку, яка складається, в основному, з центральних частин кристалітів, і модуль пружності тоді досягає 100 000 МПа. Тоді волокна є монокристалічними і складаються виключно з випрямлених ланцюгів.

4.4.4. Виготовлення комбінованих (двошарових) плівок (дублювання)

Процес здійснюється нанесенням плоскої плівки на підкладку в процесі екструзії. Як підкладку можна використовувати металеву фольгу, папір, тканину, іншу полімерну плівку тощо.

Принцип дублювання.

Плівка приводиться у контакт з підкладкою до моменту охолодження і в подальшому протягується сумісно з нею (рис. 4.85).

Для виготовлення комбінованих плівок найчастіше використовують поліетилен, поліпропілен, полівінілхлорид (пластифікований).

Основна проблема дублювання: досягнення необхідної адгезії між плівкою і підкладкою. При дублюванні матеріалів з пухкою поверхнею адгезія забезпечується за рахунок затікання полімеру в мікронерівності його поверхні. В цьому випадку адгезія пропорційно залежить від тиску притискання і температури розтопу.

У випадку дублювання полімерних плівок, що використані як підкладка, адгезію, найчастіше, підвищують методом фізичної активації їхньої поверхні. До такої обробки, зокрема, належить обробка поверхні коронним електричним розрядом, УФ світлом. При такій обробці час експозиції обмежується окисним старінням полімеру і не перевищує 3 ÷ 5 сек.

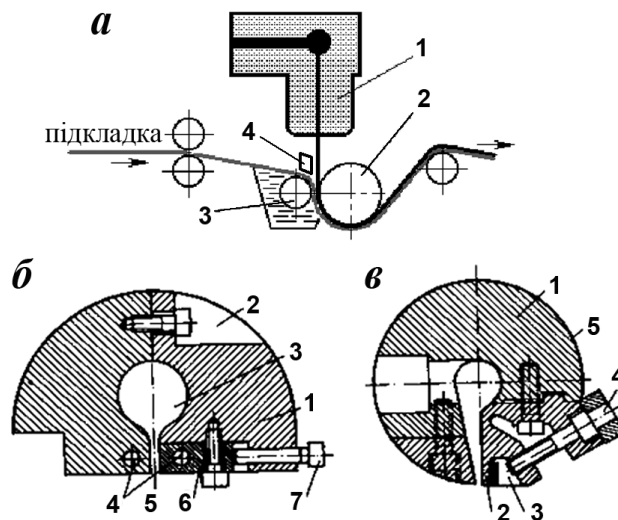


Рис. 4.85. Схема екструзійного дублювання:

- а) схема процесу: 1 – екструзійна плоскоциліндра головка; 2 – охолоджувальний вал;
3 – притискний валок із силіконовим покриттям; 4 – нагрівник;
- б) поперечний розріз головки: 1 – корпус; 2 – нагрівник; 3 – розподільний канал; 4 – нагрівний пристрій; 5 – щілина; 6 – пересувна штивна губка; 7 – гвинт для переміщення штивної губки;
- в) видозмінена конструкція головки: 1 – корпус; 2 – губка рухома пружна;
3 – проріз для переміщення губки; 4 – регульовальний гвинт; 5 – нагрівник

При нанесенні на поверхню підкладки поліетиленової плівки не завжди вдається досягти потрібного зусилля зчеплення через його низьку адгезійну здатність і після фізичної обробки. У таких випадках використовують спосіб з попереднім лакуванням поверхні

підкладки клейкими речовинами (наприклад, каучуком). Такий спосіб називають дублюванням з попереднім апретуванням.

Для виготовлення багатшарових плівок перспективним на сьогодні є запропонований спосіб так званої ко-екструзії. При цьому способі екструдати з'єднуються між собою на стадії розтопу при формуванні полотна у щілині (4.4.12). Технологія заснована на екструзуванні різних полімерів з окремих екструдерів в одну головку з відповідною кількістю колекторів. З'єднання плівок здійснюється, або на виході з головки або в місці контакту з охолоджуючим барабаном. Можливе зливання потоків у самій головці. Такий спосіб дозволяє отримати комбіновані плівки з підвищеною міцністю зчеплення і прозорістю. Однак, він можливий для полімерів з близькими реологічними і теплофізичними характеристиками, а також з близькими коефіцієнтами температурної усадки.

4.4.5. Види браку при екструзії плівок, його причини і способи усунення

При виготовленні плівок можуть виникати порушення технологічного процесу, або неправильне його встановлення, можливі збої в роботі обладнання та недозволені зміни технологічних характеристик сировини. Це призводить до виникнення дефектів плівок. В таблиці 4.17 подані види браку плівок, його причини та шляхи усунення.

4.4.6. Технологія одержання листів методом екструзії

Листи – це пласкі вироби з термопластів мінімальною товщиною $0,125 \div 0,5$ мм і більше, які формуються на екструзійних листувальних агрегатах пласкощілинним способом. Максимальна товщина листа не перевищує 20 мм, враховуючи низьку теплопровідність полімерних матеріалів.

В Україні поширене виробництво рулонних матеріалів з товщиною до 2 мм і листів з товщиною до 6 мм і шириною до 1500 мм.

Для виготовлення листів використовують такі полімерні матеріали: поліетилен високої густини, поліпропілен, ударотривкий полістирол, АВС-пластик, ацетилцелюлозні етроли, непластифікований ПВХ, полікарбонат.

Найчастіше листи виготовляють з полістирольних пластиків. Так, на Дніпродзержинському ВАТ „ДніпроАзот” виготовляють листи з ударотривкого полістиролу (ГОСТ 6-19-510-90) з матовою і глянцевою поверхнею товщиною $2,5 \div 6,0$ мм, шириною $700 \div 1450$ мм, довжиною $630 \div 1520$ мм. Листи мають такі механічні властивості: міцність при розтягу – $17,0 \div 18,0$ МПа, відносне видовження при розриві – $25 \div 36$ %, ударна в'язкість за Ізодом – $25 \div 42$ кДж/м.

Листи використовують як облицювальний і футерувальний матеріал, а також як напівфабрикат для одержання виробів (шафи, ємності) термоформуванням. Із листів отримують деталі для автомобілів, корпуси човнів, ємності для рідини і т.п.

4.4.6.1. Технологічна схема екструзії листів

Гранули термопласту після підсушування потрапляють у матеріальний циліндр екструдера **1** (рис. 4.86).

В екструдері відбувається топлення, гомогенізація і пластикація розтопу, а потім його витискання через фільтруючі сітки в пласкощілинну головку **2**. Найбільш поширеними є клиновидні головки з каналами для підведення розтопу типу „риб'ячий хвіст”, або з додатковим розподільним шнеком у колекторі (особливо при екструзії таких високов'язких розтопів, як розтопи етролів). З головки плоска заготовка потрапляє на гладильно-полірувальний охолоджувальний каландр **3**, що призначений для фіксації форми і товщини полотна, а також для вигладжування, глянцеювання поверхні листа, яка після виходу з щілини головки внаслідок релаксації напружень зсуву в'язкої течії може бути відчутно бугристою.

Наявність трьох валків у гладильному каландрі дозволяє проводити двостороннє охолодження листа. Після обрізання кромки дисковими ножами 4 полотно потрапляє на рольганговий транспортер 5. Довжина його може досягати 3,5 м. Для інтенсифікації охолодження з обох сторін транспортера можуть бути встановлені повітряні вентилятори. Рольганг-транспортер призначений для остаточного охолодження листа, і він складається з вільнообертювальних валків з полірованого металу, або покритих гумовою оболонкою.

Таблиця 4.17

Види браку екструдованих плівок, причини його виникнення і способи усунення

Види браку	Причини браку	Способи усунення
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Наявність „геликів” у плівці	Полідисперсність; не розтоплені частинки з відходів; часткове розкладання матеріалу; погана гомогенізація маси	Понизити температуру екструзії; змінити марку полімеру; припинити домішку відходів; почистити від полімеру головку; підвищити перепад тиску у головці
Смуги на плівці	Розкладання полімеру; брудна головка; нерівномірна температура головки	Знизити температуру екструзії; змінити марку полімеру; почистити головку; вирівняти температуру по ширині головки
Асиметричність роздутого рукава	Погано відрегульована головка	Відрегулювати розмір формуючого отвору по периметру і температуру по зонах головки
Нестабільність роздутого рукава	Пульсація розтопу; нерівномірність подання повітря на рукав; рух навколишнього повітря	Зменшити швидкість екструзії; підвищити тиск у головці; відрегулювати подання повітря в рукав; капсулювати рукав
Утворення зморщок у плівці	Неправильна установка агрегату; різнотовщинність плівки; протяги; не відрегульований натяг плівки	Усунути перекіс намотувальних валків, головки, щік; усунути нерівномірність охолодження плівки шляхом капсулювання; відрегулювати натяг; змінити кут розкладу щік
Поперечні зморшки на плівці	Поява напружень у плівці при низькій температурі охолоджувального валка; досить низька лінія кристалізації	Змінити марку полімеру; підвищити температуру екструзії; у випадку плоскої плівки зменшити відстань між головою і охолоджувальним валком; у випадку рукавної плівки – підвищити ступінь витяжки чи зменшити відстань до лінії кристалізації
Матова (шорстка) поверхня плівки; розриви на поверхні	Висока швидкість екструзії; низька температура розтопу; неправильна геометрія щілини	Знизити швидкість екструзії; підвищити температуру; змінити головку
Срібlistість, мікротріщини на поверхні	Занижена температура охолодження; низька температура розтопу	Відкоригувати температурний режим
„Риб’яча луска” – мікророзриви на поверхні, шорстка поверхня	Висока швидкість екструзії; низька температура розтопу	Зменшити швидкість екструзії; підвищити температуру розтопу; підсушити сировину

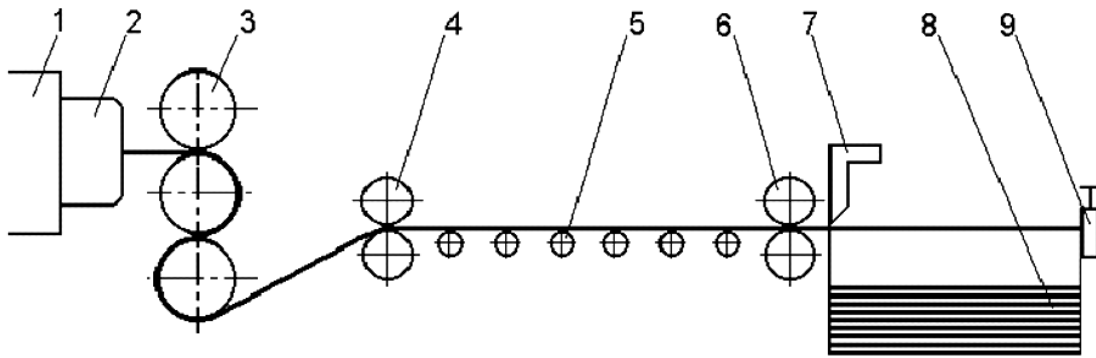


Рис. 4.86. Агрегатна лінія для екструзії листів:

1 – екструдер; 2 – плоскоциліндрна головка; 3 – гладильно-полірувальні валки; 4 – дискові ножі;
5 – рольганг; 6 – тягові валки; 7 – відрізний пристрій; 8 – датчик довжини листа;
9 – штабелер (укладальник листів)

Тягові валки (6) призначені для приймання листа. Для кращого зчеплення з поверхнею листа їх покривають гумою. Швидкість тягових валків повинна бути дещо меншою, ніж швидкість полірувальних валків, щоб компенсувати збіжність (усадку) матеріалу при охолодженні листа.

Відрізний пристрій 7 (гільйотина або циркулярна пила) призначений для нарізання листів необхідної довжини. Відрізний пристрій включається, коли полотно вмикає кінцевий вимикач 8. Пила розрізає по ширині лист разом з його переміщення вперед, оскільки екструзія – неперервний процес. Поздовжнє різання здійснюється дисковими пилами. Відрізані листи складаються листоукладачем 9 в контейнери. Після накопичення необхідної кількості листів в контейнері він за допомогою автотранспорту чи маніпулятора подається на бракування, зважування і пакування. Пакети масою не більше 500 кг обертають папером (ГОСТ 8273-75) і закріплюють сталеву чи поліпропіленову стрічкою.

4.4.6.2. Технологічні параметри екструзії листів

Технологічними параметрами екструзії листів є температура зон циліндра і головки; температура полірувальних валків каландра; швидкість відведення листа; частота обертання шнека.

Температура зон циліндра і головки визначається видом термопласту, який переробляється, і його властивостями, передусім молекулярною масою, яка визначає показник текучості розтопу (ПТР). Так, при екструзії листів, товщиною 2 ÷ 4 мм з ПЕВГ, в котрого ПТР = 0,5 ÷ 0,6 г/10 хв, температура циліндра по зонах встановлюється в діапазоні 135 ÷ 190 °С. При одержанні листів товщиною більшою, як 5 мм, використовується більш високомолекулярний ПЕВГ з ПТР = 0,2 ÷ 0,4 г/10 хв, і температуру по зонах підвищують на 10 ÷ 20 °С. Більш тонкі листи виготовляють з ПЕВГ, в котрого ПТР = 0,6 ÷ 1,2 г/10 хв при температурі зон на 15 ÷ 20 °С нижчій, ніж у першому випадку.

Для одержання листів з непластифікованого ПВХ використовують полімер з константою Фікентчера 63. Використання більш високомолекулярного ПВХ утруднює формування листа через високу в'язкість розтопу. Останнім часом для одержання листів з непластифікованого ПВХ використовують двошнекові екструдери і переходять від двостадійного процесу виробництва (з попередньою грануляцією композиції) до одностадійного – завантаження шнекового екструдера здійснюють порошкоподібною композицією і проводять дегазацію розтопу в зоні дозування.

При одержанні листів з полікарбонату температура екструзії підвищується до 350 °С, а температура поверхні валків – до 150 ÷ 180 °С. Екструзійна головка повинна максимально наближатися до щілини гладильно-полірувальних валків.

Температура полірувальних валків залежить від виду полімеру, швидкості екструзії і товщини листа. Висока швидкість екструзії і відведення полотна вимагають пониження температури полірувальних валків. При екструзії тонких листів температуру валків встановлюють більш високою, ніж при екструзії товстих листів. В таблиці 2.4 подані приблизні температурні режими екструзії з термопластів.

Температура валків, які першими контактують з листом, повинна бути нижчою від температури липкості, а температура третього валка – нижчою за температуру склування полімеру. Швидке охолодження поверхні листа з одного боку може спричинити виникнення великих напружень у матеріалі. Це може призвести до виникнення жолоблення, мікротріщин на поверхні і в об'ємі листа.

На відміну від екструзії плоских плівок при виготовленні листів відсутня витяжка, тому швидкість відведення листа завжди рівна, або менша за швидкість екструзії, яка визначається швидкістю обертання шнека. На практиці швидкість відведення листа встановлюється в межах 0,6 ÷ 18 м/хв., залежно від товщини – оберненопропорційно.

Таблиця 4.18

Температурні режими екструзії листів з термопластів

Термопласт	Температура циліндра по зонах, °С				Температура головки, °С	Температура полірувальних валків, °С
	1	2	3	4		
ПЕНГ	120÷130	130÷140	140÷150	160÷180	180÷190	60÷80
ПЕВГ	130÷140	150÷170	170÷180	180÷200	190÷210	65÷95
ПП	190÷200	210÷220	220÷230	230÷240	220÷240	90÷120
Ударотривкий ПС	160÷170	170÷180	180÷190	190÷210	180÷230	60÷85
АВС - пластик	170÷180	180÷190	190÷200	200÷220	200÷230	70÷95
ПВХ непластифікований	150÷170	160÷180	170÷190	175÷195	190÷210	70÷100
Етрол АЦЕ - 47ТВ	150÷160	170÷180	180÷190	190÷200	185÷200	80÷90

Швидкість відведення полотна встановлюють відповідно до продуктивності лінії. Суттєву роль відіграє товщина листа: чим більша товщина листа, тим нижча швидкість відведення його. Правильний вибір швидкості відведення дозволяє позбутися таких дефектів, як шорсткість поверхні, різнотовщинність листа тощо.

Частота обертання шнеку впливає на ступінь однорідності розтопу і якість листів. Висока швидкість обертання шнеку може бути причиною низької механічної міцності, а також тьмяної поверхні листа.

Термопласти, які здатні до термогідролітичної деструкції, перед екструзією слід підсушити. Наприклад, етроли підсушують до вмісту вологи 0,1 ÷ 0,25 %, АВС-пластик – до 0,1 %. Сушіння бажано здійснювати при температурі 80 ÷ 100 °С в сушарках з рециркуляцією повітря або в вакуум-сушарках.

Контроль технологічного процесу ведуть за: а) якістю поверхні листа (візуально), оптичним пристроєм; б) режимом охолодження: загинання кромки вгору (жолобляться) означає надто інтенсивне охолодження, а пригинання кромки униз – надто високу температуру нижнього валка гладильно-полірувального пристрою; в) товщиною, яка контролюється механічними засобами, оптичними та променевими.

Останні два засоби можуть бути використані для програмованого керування процесом за допомогою ЕОМ.

4.4.6.3. Спеціальні технологічні процеси екструзії листів

1. Для нанесення на лист іншого кольору або для створення поверхні з іншими властивостями проводять дублювання листа іншою двовісноорієнтованою плівкою.

2. Для виробництва лінолеуму з двох різних композицій ПВХ використовують агрегат для екструзії двошарових листів (дублювання листів). Дублювання здійснюють у головці, після чого екструдат надходить на гладильно-охолоджувальний пристрій, а потім – у термокамеру для зняття внутрішніх напружень на межі стику.

Методом ко-екструзії отримують багатошарові листи. Кількість шарів визначає відповідну кількість матеріальних циліндрів.

3. Дублювання листів ПВХ чи ПЕ з металевою або полімерною сіткою полягає в тому, що між двома потоками в головці подається сітка. Другий спосіб – сендвіч з двох листів і сітки пропускається через нагрівні валки з притисканням і наступним охолодженням.

4. Екструзія багатоколірних листів (наприклад, з етролів для окулярних оправ) здійснюється двома шляхами:

- а) ко-екструзією листа з різноколірного матеріалу. В цьому випадку змішування потоків відбувається у колекторі, куди розтопи надходять через окремі канали, які забезпечують ламінарний потік, або в щілині головки, куди розтопи надходять з окремих колекторів по окремих каналах. В такому випадку важко дотримувати ламінарність потоків;
- б) способом ко-екструзії від багатьох агрегатів через один дозуючий колектор отримують гранули з багатоколірного (змішаного) матеріалу. Після чого проводять екструзію листа на одному агрегаті. Тут значно менші вимоги до ламінарності потоку при ко-екструзії.

5. Одержання листів з пінопластів здійснюється також двома шляхами:

- а) екструзія полімеру з піноутворювачем. При такому способі ставлять суворі вимоги до терміну зберігання матеріалу і температурного режиму піноутворення (розкладу піноутворювача);
- б) введення газоподібного пороутворювача в зону дозування екструдера.

6. Виготовлення гофрованого листа:

- а) з поздовжніми гофрами, коли сформований лист нагрівають і протягують через гофруючий пристрій зубчастого типу;
- б) з поперечними гофрами – лист протягують через систему різнорозміщених (різний рівень осей обертання) роликів.

4.4.6.4. Можливий брак при формуванні листів

У таблиці 4.19 зведені основні види дефектів листів, виготовлених з термопластів методом екструзії, причини і шляхи їх усунення.

4.4.7. Технологія виробництва полімерних труб методом екструзії

Процес базується на перетисканні розтопу полімеру через кільцеву щілину прямої чи кутової головки з наступною фіксацією форми та розмірів екструдованої заготовки.

Методом екструзії можна виготовити труби діаметром від 1 мм до 1,6 ÷ 2 м і товщиною стінки від долей міліметра до 20 мм. Товщина стінки визначається тиском, на який розраховується труба при експлуатації. Труби з діаметром, меншим за 3 мм, називають капілярами.

Види браку при екструзії листів, причини виникнення і способи усунення

Види браку	Причини браку	Способи усунення
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Поздовжні смуги і rischi	Дефекти робочих поверхонь формувального інструменту (головки полірувального валика)	Відшліфувати робочі поверхні головки і валика
Тьмяна поверхня	Розклад полімеру внаслідок перегріву; високі оберти шнеку; забруднене устаткування	Очистити циліндр екструдера і головку; відрегулювати температурний режим і оберти шнека
Шорсткість поверхні	Забруднена чи волога сировина; низька температура розтопу; забруднення робочих поверхонь головки; нерівномірне живлення екструдера; високі оберти шнеку	Замінити сировину чи підсушити її; підвищити температуру головки; відшліфувати робочу поверхню головки; зберігати рівномірність живлення екструдера; зменшити оберти шнеку
Низька механічна міцність	Погане переміщення розтопу; не відрегульований температурний режим; висока швидкість відведення	Збільшити температурний опір у головці встановленням додаткових сіток; відрегулювати температурний режим екструзії; зменшити оберти тягових валків
Жолоблення листів	Низька температура гладильно-полірувального пристрою	Збільшити температуру валків
Сторонні включення	Недостатньо густий пакет фільтруючих сіток	Збільшити число фільтруючих сіток
Різновщинність у поперечному напрямку	Зміщення формуючої щілини; нерівномірність розподілу температур на перетині головки	Відрегулювати формуючу щілину; відрегулювати температуру в головці
Різновщинність у поздовжньому напрямку	Змінна швидкість відведення виробу; пульсація розтопу; недостатній опір головки	Відрегулювати швидкість відведення листа; змінити частоту обертання шнека; відрегулювати температуру циліндра по зонах і охолодження шнека; знизити температуру головки; збільшити опір головки; зменшити частоту обертання шнеку
	Нерівномірна швидкість відведення листа	Більше притиснути валки тягового пристрою

Для виробництва труб методом екструзії використовують: поліетилен високої і низької густини, поліпропілен, полівінілхлорид, АВС-пластик, фторопласт, силіконовий каучук тощо. Для виготовлення труб використовують полімери з ПТР = 0,3 ÷ 0,7 г/10 хв.

Залежно від робочого тиску рідини в трубах з ПЕВГ випускають такі типи труб: Л – легкі (робочий тиск 0,25 МПа), СЛ – середньолегкі (робочий тиск 0,4 МПа), С – середні (робочий тиск 0,6 МПа), В – важкі (робочий тиск 1 МПа). Зовнішній діаметр цих труб може бути від 63 до 1200 мм. Труби з ПП випускають трьох типів: Л, С і В, які розраховані відповідно на робочий тиск 0,25; 0,6 і 1,0 МПа. Зовнішній діаметр таких труб – від 10 до 450 мм. Труби з ПЕ і ПП використовують для транспортування води, повітря, деяких рідин, до яких стійкі ці матеріали, газу.

З непластифікованого ПВХ (вініпласту) випускають труби з зовнішнім діаметром від 10 до 450 мм, які розраховані на робочий тиск $0,25 \div 1,6$ МПа. Ці труби використовують для транспортування технічної води та хімічно агресивних рідин.

З пластифікованого ПВХ (пластикату) випускають шланги поливальні (для води), оливобензостійкі та ін. Шланги – це труби з малою товщиною стінки, яким властива добра гнучкість.

Фторопластові труби (з фторопласту Ф-4Д) виготовляють діаметром від 30 до 600 мм і використовують для транспортування агресивних рідин.

Останнім часом у сільському господарстві, електротехніці, медицині, при виготовленні побутових виробів і т.п. широко використовують гофровані труби і шланги. Перевага гофрованих труб – у комбінації поздовжньої гнучкості з поперечною штивністю. Гофровані труби і шланги випускають діаметром від 16 до 200 мм.

Переваги полімерних труб порівняно з металевими: вони еластичні, легко витримують гідравлічні удари. Полімерні труби не кородують. Вони мають рівну внутрішню поверхню, що зменшує опір течії рідин. Полімерні труби також легко з'єднувати за допомогою зварювання чи склеювання. Завдяки таким своїм якостям полімерні труби широко використовують у різних галузях народного господарства.

4.4.7.1. Технологічна схема одержання труб

Технологічний процес одержання труб здійснюється за допомогою агрегатів: ЛТ 63×25/63, ЛТ 90×25-75/160, ЛТ 125×25-140/400, ЛТ 160×25-400/800. На рис. 4.87 наведена агрегатна лінія для екструзії труб.

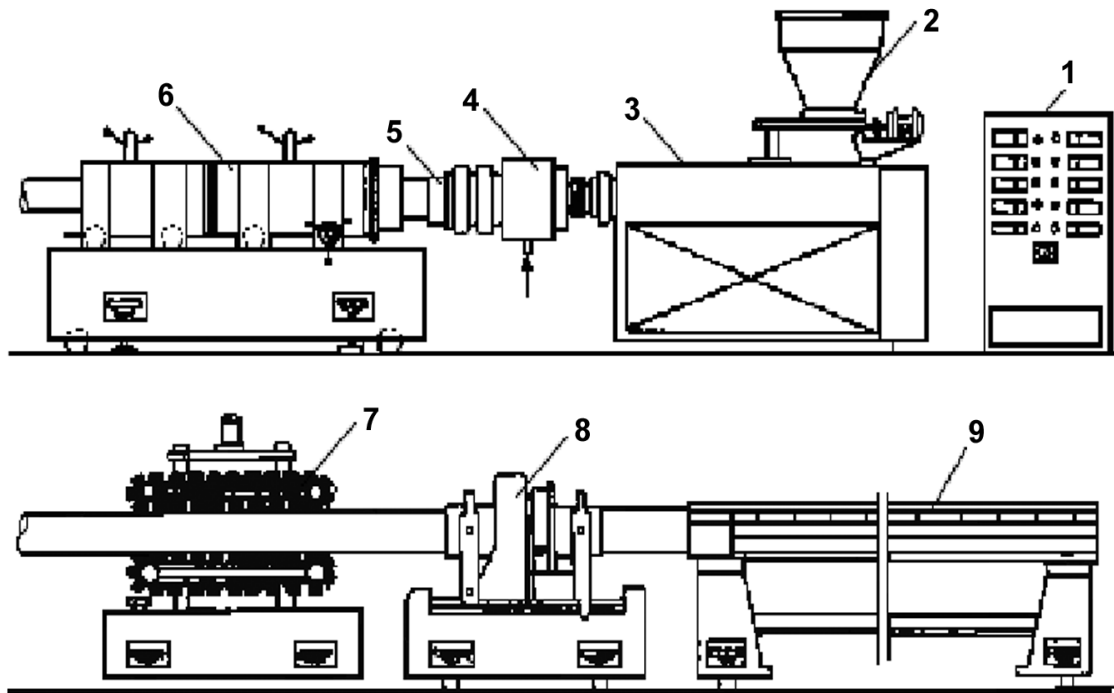


Рис. 4.87. Агрегатна лінія для екструзії труб:

- 1 – пульт керування; 2 – завантажувальна лійка; 3 – екструдер; 4 – головка;
5 – калібрувальний пристрій; 6 – водяне охолодження; 7 – тяговий пристрій;
8 – відрізний пристрій; 9 – приймальне устаткування

Розтоп з екструдера 3 перетискається через трубну головку 4 у вигляді заготовки кільцевого перетину. Заготовка надходить у калібрувальний пристрій 5, де відбувається її початкове охолодження і калібрування (фіксація форми і розмірів внаслідок утворення поверхневої високоеластичної оболонки при контакті з холодною поверхнею гільзи). Далі

труба надходить у охолоджувальну ванну 6. Тяговий пристрій 7 призначений для відведення і переміщення труби через калібрувальну насадку і охолоджувальну ванну. Для покращення захоплення труби широко використовується тяговий пристрій з плазунувими биндами.

Пристрій для нарізання труб 8 складається з циркулярних пил різних конструкцій, які працюють в автоматичному режимі. В процесі різання труби пила переміщується разом з трубою. Команда на різання подається мікровимикачем після того, як труба пройде певну ділянку. Після відрізання труби вона потрапляє на приймальне обладнання 9, а відрізний пристрій переміщується у вихідне положення до наступного вмикання. Калібрувальний пристрій призначений для стабілізації розмірів зовнішнього чи внутрішнього діаметрів трубної заготовки і надання їй необхідної стійкості форми. Найпоширенішим є спосіб калібрування труб за зовнішнім діаметром. На рис. 4.88 показано зовнішнє калібрування труби, при котрому притискання до стінок насадки здійснюється стисненим повітрям. Стиснене повітря найчастіше використовують при формуванні труб великих діаметру і товщини або з штивних полімерів (ПВХ непластифікований, ПП).

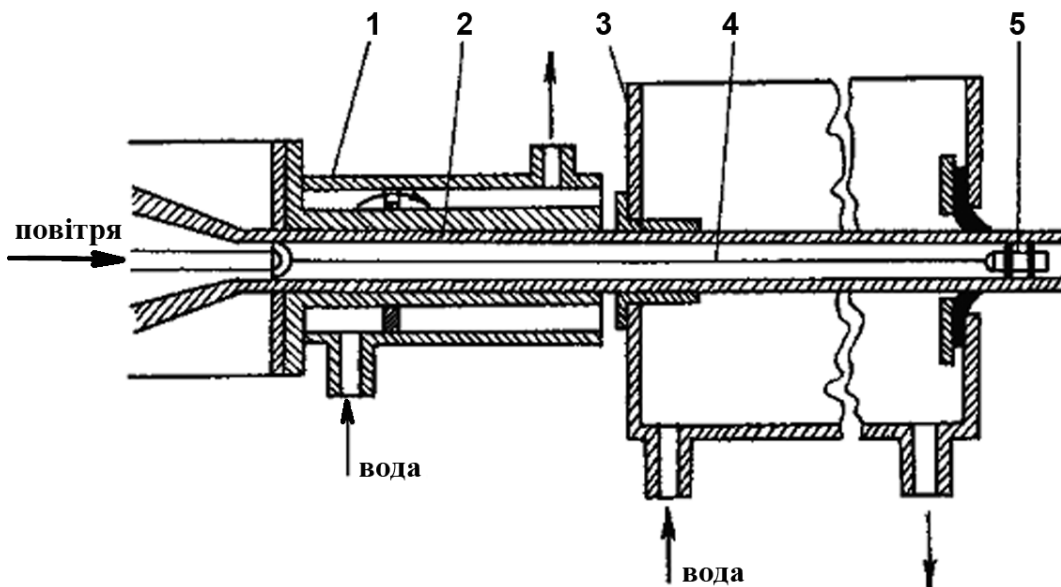


Рис. 4.88. Калібрування труби стисненим повітрям:

1 – калібрувальна втулка; 2 – труба; 3 – охолоджувальна ванна; 4 – трос; 5 – „плаваючий” корок

У трубну заготовку 2, яка проходить через калібрувальну насадку (гільзу) 1, по каналу у дорні подається стиснене повітря, яке притискує трубу до поверхні гільзи. Тиск у трубі зберігається завдяки „плаваючому” корку 5, що утримується в постійному положенні за допомогою електромагніта чи троса 4, який приєднаний до дорна. Притискання трубної заготовки до стінок гільзи може здійснюватись за допомогою розрідження, яке подається між трубою і гільзою.

На рис. 4.89 показано вакуумний калібрувальний пристрій.

Гаряча, м’яка труба з розтопу полімеру притискується атмосферним тиском до тієї частини калібрувальної втулки, яка проходить через вакуум-секцію калібрувального пристрою. У сорочку гільзи подається холодна вода для підтримання необхідної температури калібрування.

При виробництві труб з зовнішнім каліброваним діаметром використовують прямооточну головку, а при необхідності калібрування внутрішнього діаметру - кутову головку.

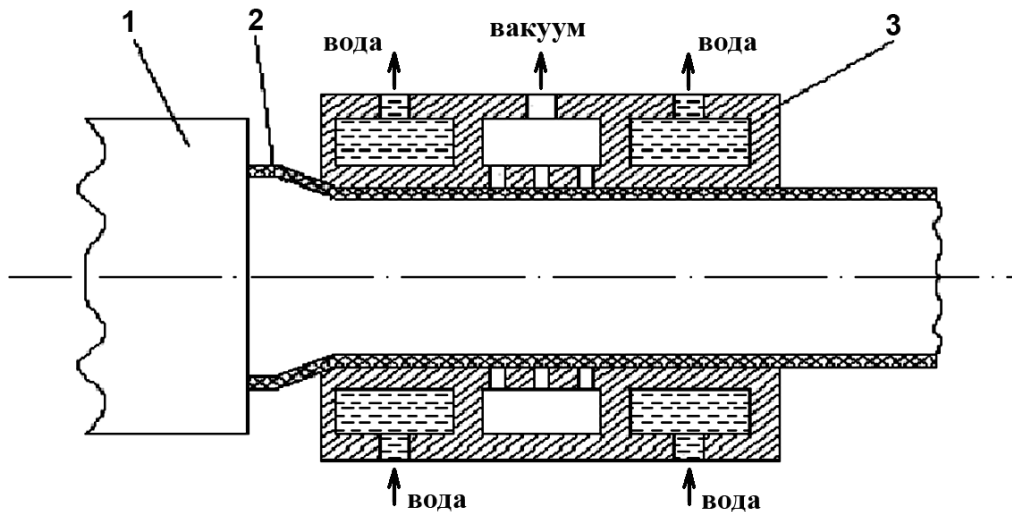


Рис. 4.89. Вакуумний калібрувальний пристрій:
1 – головка; 2 – труба; 3 – насадка

Калібрування труби за внутрішнім діаметром здійснюють за допомогою подовженого дорна, який охолоджується всередині і по зовнішній поверхні якого протягується труба.

При калібруванні велике значення має температура стінки гільзи (T_{cm}). Надто різке охолодження кристалічних полімерів може викликати мікротріщини на поверхні. Однак T_{cm} повинна забезпечити температуру зовнішньої стінки труби, нижчу за температуру липкості, бо вище від неї значно зростає коефіцієнт тертя труби до стінки гільзи, який викликає появу внутрішніх напружень на зовнішній стороні труби, а також погіршення поверхні труби. З другого боку, залежність якості поверхні труби від температури гільзи зумовлена надмолекулярною структурою полімеру. Для аморфних полімерів чим вища температура гільзи, тим нижча концентрація залишкових напружень, що зумовлює зменшення анізотропії міцності по перетину труби. У випадку переробки кристалічних полімерів з підвищенням температури калібрувальної гільзи знижується ступінь кристалічності, що призводить до зменшення шорсткості поверхні і поверхневої міцності труби.

Внутрішній тиск повітря (тиск калібрування) вибирається залежно від діаметру труби, товщини стінки, температури розтопу і природи полімеру. Із зростанням внутрішнього тиску зростає величина орієнтаційних напружень як у радіальному, так і в осьовому напрямку труби. Надміру високий тиск викликає зменшення міцності труби, очевидно, внаслідок утворення мікротріщин від високого тертя до гільзи. Недостатній тиск призводить до погіршення поверхні труби (виникає поверхнева шорсткість). Тиск, як правило, підбирають експериментально.

При калібруванні зовнішнього діаметру потрібно враховувати усадку труби при охолодженні. Через це діаметр гільзи розраховують з залежності:

$$D_z = D_{зов} \cdot (1 + U/100) + \Delta, \quad (4.96)$$

де: U – усадка (температурна) в %; Δ – допуск на виготовлення гільзи; $D_{зов}$ – зовнішній діаметр труби.

Довжина калібрувальної насадки розраховується з умови утворення на поверхні труби високоеластичної стійкої плівки, товщиною не менше, ніж 0,39 мм. Тоді, використовуючи час, який необхідний для досягнення такої товщини при конвективному теплообміні, коли профіль трубної заготовки притискається до холодної стінки насадки, можна визначити її довжину:

$$l = \theta \cdot v_e, \quad (4.97)$$

де: θ – час утворення високоеластичної плівки з товщиною 0,39 мм;

v_e – швидкість відведення трубки.

У зв'язку із властивим еластичним відновленням (роздуванням) трубної заготовки на виході з головки, діаметр щілини головки розраховують з урахуванням цього ефекту:

$$D_{щ} = D_z / 1,01, \quad (4.98)$$

Охолоджувальна ванна служить для охолодження труби, яка безперервно надходить до неї із калібрувального пристрою. Вода у ванні проточна. Довжина її залежить від діаметра екструдованої труби, швидкості її відведення і виду полімеру. Наприклад, якщо екструдується кристалічний полімер, то довжина ванни повинна бути більшою для відведення тепла кристалізації. Для розрахунку довжини охолоджувальної ванни використовують формулу з урахуванням швидкості відведення труби:

$$v_e = \frac{a \cdot (L_n + L_{охол})}{F_o \cdot (R_z - R_B)}, \quad (4.99)$$

де: a – коефіцієнт температуропровідності полімеру; L_n – довжина калібрувальної насадки; $L_{охол}$ – довжина охолоджувальної ванни; F_o – критерій Фур'є; R_z – зовнішній радіус труби; R_B – внутрішній радіус труби.

Полотно розрізається циркулярною пилою на труби відповідної довжини або намотується на барабани. Остання операція проводиться при виробництві т.з. кабелів – труб з тонкою стінкою і гнучких труб малих діаметрів.

4.4.7.2. Основні технологічні особливості екструзії труб за стадіями процесу.

Стадії формування

Основна технологічна відмінність при екструзії труб – це відсутня витяжка розтопу. Полотно труби формується завдяки потоку, створеного екструдером. Відкаліброване і охолоджене неперервне полотно труби транспортується (відтягується) при допомозі стрічкового транспортера з плазуновими биндами.

1) Перша стадія – отримання (підготовка) розтопу – відбувається в екструдері поступовим топленням, гомогенізацією і накопиченням розтопу. На цій стадії необхідно забезпечити високу однорідність розтопу в об'ємі і в часі процесу (однорідність за температурою і реологічними характеристиками). Розтоп повинен бути без включень нерозтоплених гранул. Однорідності розтопу досягають геометрією шнеку і необхідним перепадом тиску по довжині циліндру, за рахунок чого досягається відповідна швидкість екструдювання.

2) Друга стадія – екструзія. Швидкість екструзії визначається досягнутим перепадом тиску і:

а) обумовлює продуктивність процесу, яка дорівнює:

$$Q = \rho_o \cdot n \cdot F \cdot V_\epsilon, \quad (4.100)$$

де: n – кількість екструзійних філь'єр; F – площа кільця щілини; V_ϵ – швидкість екструзії; ρ_o – густина розтопу.

Отже вибір екструдату здійснюється за продуктивністю і необхідним перепадом тисків, які визначаються з потрібної (встановленої) швидкості екструзії.

Для виготовлення труб, як правило, використовують екструдери з подовженою зоною дозування. Крім цього часто використовують двошнекові екструдери, особливо при переробці порошкоподібної сировини. Переробка високов'язких полімерів і при формуванні труб великого діаметру використовують двоступеневі екструдери, коли на першій ступені здійснюється завантаження і топлення сировини, а на другій – гомогенізація і накопичення. Таке розділення значно підвищує продуктивність агрегату.

Досягнута продуктивність не повинна перевищувати граничного значення продуктивності: $Q_{\text{граничне}} \leq 0,6 \div 0,7 Q_{\text{макс}}^{\text{агрегату}}$.

Запас потужності використовується для можливої корекції технологічних параметрів у випадку відхилення характеристик сировини, чи властивостей труби від розрахункових.

б) швидкість екструзії рівна швидкості відведення труби і повинна забезпечити ламінарний потік розтопу, бо в протилежному випадку появляється шорсткість, бугристість на поверхні профілю труби внаслідок так званої еластичної турбулентності на виході розтопу із щілини. Еластична турбулентність виникає внаслідок релаксації напружень зсуву, які утворюються в різних напрямках через псевдотурбулентний рух розтопу в щілині і не встигають в ній релаксувати.

в) швидкість екструзії крім цього визначає довжину охолоджувальної ванни: чим більша швидкість, тим довша ванна.

3) Після тонкої фільтрації на пакеті тонких сіток розтоп поступає на стадію формування профілю труби в екструзійній головці (прямоточній або кутовій).

При екструзії через прямоточну головку характерним є утворення “холодних спаїв” по довжині полотна, які утворюються внаслідок стискання потоків розтопу після проходження через отвори дорноутримувача (рис. 4.90). Потоки злипаються, але через високу в’язкість розтопу не зливаються, утворюючи шов – “холодний спай”.

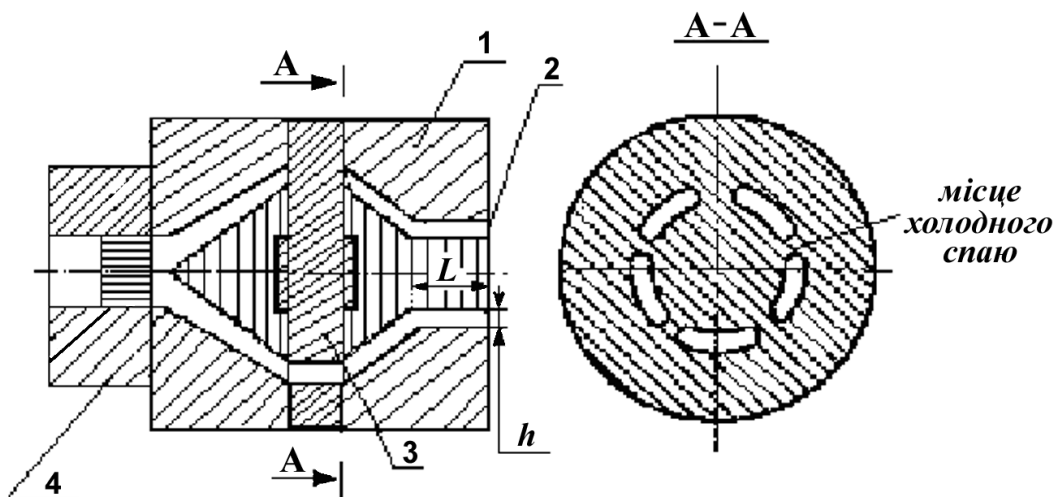


Рис. 4.90. Схема прямоточної кільцевої головки:

1 – циліндр; 2 – дорн; 3 – дорноутримувач; 4 – пакет фільтрувальних сіток

При екструзії через кутову головку може утворюватись тільки один спай від злипання розтопу після обтікання по кільцю (див. рис. 4.92). В такій головці дорноутримувач розміщений перед матеріальним потоком. Крім цього відмінність кутової головки від прямоточної полягає також в тому, що її конструкція надає можливість охолодження дорна, внаслідок чого є можливим внутрішнє калібрування.

Холодні спаї, як ми вже знаємо, значно підвищують концентрацію внутрішніх напружень в роботі і понижують механічні властивості труб.

Усунути холодні спаї можна:

а) нанесенням гвинтової нарізки на дорні і циліндрі головки в переході після дорноутримувача до щілини. Внаслідок того розтоп тече при стінках в різних напрямках. Крім уникнення холодних спаїв при цьому спостерігається часткова тангенціальна орієнтація, що підвищує стійкість труб до внутрішнього тиску, який, безумовно, вищий у випадку відсутності спаїв.

Тиск, який може витримати труба, розраховується з залежності:

$$P_{\max} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot s}{d_{cp}}, \quad (4.101)$$

де: s – товщина стінки труби; $d = d_{\max} + d_{\min}/2$ – середній діаметр труби;

$[\sigma]$ – припустиме напруження руйнування полімеру,

$[\sigma]$: ПЕНГ = 2,5; ПЕВГ = 5,0; ПВХ \approx 7,5 МПа.

б) підвищенням температури розтопу і швидкості течії, що призводить до зменшення в'язкості розтопу, а, отже, до покращення зливання потоків. Температура розтопу і співвідношення швидкостей екструзії і прийому труби суттєво впливають на якість труби, її міцнісні характеристики. Як відомо, із зменшенням в'язкості при підвищенні температури зменшуються напруження зсуву, які виникають при течії, крім цього орієнтація і час релаксації напружень також стають меншими. В зв'язку з цим міцність в осьовому напрямку понижується, а отже, знижується анізотропія властивостей по сиченню труби. Нам вже відомо, що з підвищенням температури стає меншою “еластична турбулентність” після виходу розтопу із щілини, а отже підвищується якість поверхні труби – стає більш гладкою, появляється блиск.

Співвідношення швидкостей екструзії і прийому полотна визначає ступінь витяжки, яка, як відомо, обумовлює орієнтацію в напрямку витяжки.

Ступінь витяжки розраховується наступним чином:

$$\varepsilon_B = \frac{v_B}{v_\varepsilon} = \frac{\delta_m}{H_{щ}} \cdot 100\%, \quad (4.102)$$

де: δ_m і $H_{щ}$ – товщина стінки труби і висота щілини.

Чим більша ε_B , тим більша орієнтація в осьовому напрямку і тим вища анізотропія міцності $A \frac{\sigma_{\parallel}}{\sigma_{\perp}}$, яка зменшує стійкість труби до внутрішнього тиску і призводить до змін лінійних розмірів l при експлуатації труби в умовах підвищених температур.

Орієнтацію напружень легко визначити при нагріванні труби до T_m . Якщо A висока – проявляється скорочення труби. Для вирівнювання впливу σ_{\parallel} і σ_{\perp} деколи використовують головки з обертанням циліндру, що викликає орієнтацію в тангенціальному (окружному) напрямку і підвищення стійкості труби до внутрішнього тиску.

На анізотропію властивостей труби в осьовому і радіальному напрямку суттєво впливає співвідношення довжини щілини головки до її висоти (L/h).

Анізотропія менша, коли відношення (L/h) більше, бо внутрішні нормальні напруження які виникають при орієнтації напружень зсуву в'язкості течії релаксують в більшій мірі на довшому шляху в щілині (де в'язкість зберігається на нижчому рівні). Про це свідчить і математична залежність напруження зсуву від довжини каналу:

$$\tau_{zc} = f\left(\frac{\Delta P \cdot R}{2 \cdot L}\right), \quad (4.103)$$

де: R – радіус каналу; ΔP – перепад тиску.

В зв'язку з цим деколи довжину кільця ставлять в залежності від часу релаксації:

$$L \geq 3 \cdot v_\varepsilon \cdot \tau_{rel}, \quad (4.104)$$

$$\tau_{rel} = f(\eta, \tau_{zc}); \quad v_\varepsilon = \frac{V}{\pi \cdot (R_u^2 - R_d^2)}, \quad (4.105)$$

де: τ_{rel} – час релаксації напружень; V – об'ємний розхід розтопу; R_u^2 і R_d^2 – радіус циліндра і дорна. Як правило в екструзійних головках $L/h = 15 \div 30$.

Стадія калібрування труби

Калібрування – це процес, який полягає у доведенні діаметру труби до відповідного розміру і встановленні правильної циліндричної форми труби. Як вже говорилось, калібрувати можна зовнішній і внутрішній діаметр труби. При калібруванні профіль частково охолоджується для фіксації наданої йому форми.

Зовнішнє калібрування здійснюється за допомогою металевих насадок – гільз, через яку протягується профіль після виходу із щілини головки. Для інтенсифікації охолодження в сорочку гільзи подається холодна вода. Щоби не було розриву профілю гільза щільно кріпиться до головки (рис. 4.80). Для кращого притискання розтопу до стінок гільзи часто в середину труби подають стиснене повітря, яке затримується плаваючим корком. Стиснене повітря при калібруванні найчастіше використовується, коли формують труби великого діаметру з товстими стінками або з штивних полімерів. Замість стисненого повітря притискання труби до стінки гільзи може здійснюватись при допомозі розрідження, яке створюється між трубою і стінкою гільзи, воно використовується при формуванні тонкостінних труб, капілярів і шлангів.

При калібруванні внутрішнього діаметру використовують головки з подовженим дорном, який всередині охолоджується (рис. 4.91).

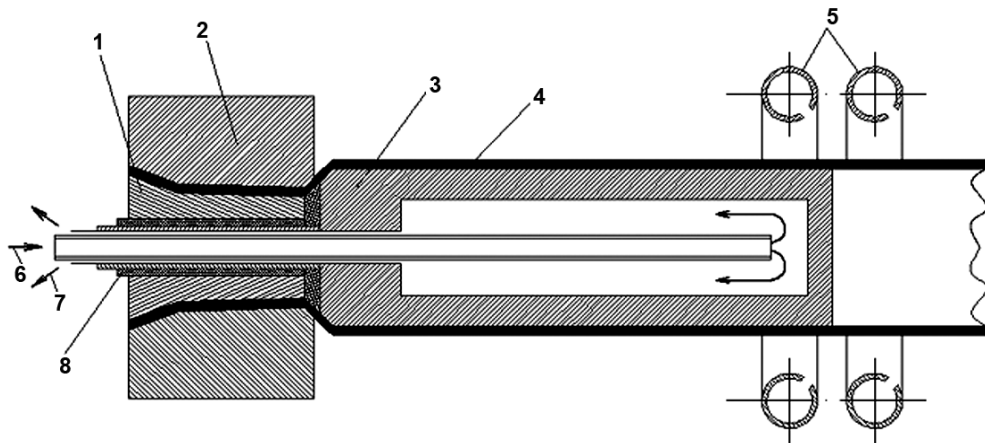


Рис. 4.91. Насадка для внутрішнього калібрування труби:
1 – дорн; 2 – мундштук; 3 – насадка; 4 – труба; 5 – охолоджуючі кільця;
6 – вхід води; 7 – вихід води; 8 – кріплення

Для вирівнювання потоку в кутовій головці на дорні виконують гвинтову нарізку до щілини.

Оскільки при охолодженні з середини відбувається внутрішня усадка із зменшенням внутрішнього діаметру труби, дорн виконаний на конус ($d_1 > d_2$) з діаметром на кінці (d_2), рівним діаметру труби. В багатьох випадках (наприклад, при переробці ПЕВГ) між трубою і дорном створюють вакуум, бо інакше утворюється негладка поверхня.

Стадія охолодження труби

Охолодження повинно забезпечити досягнення умови, коли температура внутрішньої стінки є нижча, ніж температура текучості:

$$T_{\text{внутрішнє}} < T_m (\text{пл.}) = 10 \div 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

На основі цієї залежності визначається загальна довжина охолоджувальної ванни.

Безумовно велике значення має температура води, яка визначає і час охолодження і формування надмолекулярної структури полімеру в об'ємі.

При охолодженні виникає потреба рівномірного охолодження труби за висотою: знизу інтенсивніше охолодження ніж зверху. Для вирівнювання процесу здійснюють повітряне барботування в ваннах або інтенсивне перемішування води.

4.4.7.3. Технологічні параметри екструзії труб

До технологічних параметрів екструзії труб належать: температура зон циліндра і головки; температура в калібрувальному пристрої і охолоджувальній ванні; тиск розтопу в головці, тиск калібрування.

Оптимальні параметри екструзії залежать від виду полімеру, його молекулярної маси, від розмірів труб, типу обладнання.

Температурний режим залежить в основному від виду полімеру. В таблиці 4.20 наведені температурні режими при екструзії труб і шлангів.

Таблиця 4.20

Температурні режими при екструзії труб і шлангів

Термопласт	Температура циліндра по зонах, °С				Температура головки по зонах, °С	
	1	2	3	4	1	2
ПЕНГ	125	125	130	130	130	135
ПЕВГ	140	160	165	165	165	170
ПП	180	200	215	225	225	235
Вініпласт	180	190	200	210	200	210
Пластикат	160	170	175	180	180	180

Температура води в калібрувальній насадці і в охолоджувальній ванні залежить від швидкості відведення труби і її розмірів. Чим більша швидкість відведення труби і більший її діаметр, тим інтенсивніше повинне бути охолодження. Звичайно охолодження труби регулюється кількістю води, яка подається в ванну.

Таблиця 4.21

Розраховані значення довжини охолоджувальної ванни, яка відповідає певній температурі труби

$T_n, °C$	$T_e, °C$	$T_{cp}, °C$	$\Delta T_1 = T_n - T_e$	$\alpha, \text{Вт/м}^2 \text{ К}$	$L, \text{м}$
32	21	27	11	465	6,15
54	21	38	33	750	5,2
77	21	49	56	948	5,0
99	21	60	78	1128	4,75

де: T_n , T_e , T_{cp} – відповідно температури поверхні труби, води і середнього шару труби; α – коефіцієнт тепловіддачі.

Тиск розтопу в головці також визначається типом полімеру. При екструзії труб з ПЕНГ тиск в головці становить 7,5 ÷ 11, з ПЕВГ – 9 ÷ 13, з ПП – 11 ÷ 16, з ПВХ – 25 ÷ 35 МПа.

Відхилення від оптимальних параметрів може спричинити наступні зміни якості труби: різнотовщинність в поперечному і поздовжньому напрямку, овальність, шорсткість внутрішньої поверхні та інші.

4.4.7.4. Дефекти екструдованих труб і шляхи їх усунення

У таблиці 4.22 вказані види браку труб з термопластів, його причини і методи усунення.

4.4.8. Допоміжні екструзійні процеси

Екструзію, зокрема технологію екструзії труб, використовують як допоміжний процес в інших виробництвах:

1. нанесенні металевої оболонки на металеву трубу або в металеву трубу;

2. пакуванні виробів і продуктів у полімерну оболонку;
3. нанесенні електроізоляційного покриття;
4. одержанні полімерних труб для меліорації, коли після калібрування стоїть гофруючий пристрій;
5. одержанні труб з поропластів.

Таблиця 4.22

Види браку труб, його причини і способи усунення

Види браку	Причини браку	Способи усунення
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Шорсткість внутрішньої поверхні	Висока температура розтопу чи близьке розташування запірною корка від головки	Знизити температуру головки і останньої зони циліндра чи подовжити трос запірною корка; знизити швидкість процесу
Зовнішній діаметр більший за припустимий	Недостатнє охолодження в калібрувальній пристрої; великий тиск у внутрішній порожнині труби; збільшений діаметр калібрувальної насадки	Збільшити витрату охолоджуючої води чи знизити її температуру; знизити тиск стисненого повітря; поставити калібрувальну насадку з меншим внутрішнім діаметром
Зовнішній діаметр менший за припустимий	Недостатній тиск повітря у внутрішній порожнині труби; недостатнє охолодження в калібрувальній насадці; зменшений внутрішній діаметр калібрувальної насадки	Збільшити тиск стисненого повітря; зменшити швидкість відведення труби і збільшити надходження охолоджувальної води в насадку; поставити калібрувальну насадку з більшим внутрішнім діаметром
Поздовжні потовщення, які симетрично розташовані на внутрішній стінці труби	Недостатнє стиснення розтопу у головці і вирівнювання швидкостей окремих потоків розтопу	Установити головку з більшим прохідним перетином у дорнотримачі
Концентричні хвилеподібні потовщення, що періодично повторюються вздовж труби	Пропускання стисненого повітря через запірний корок	Знизити тиск стисненого повітря; змінити запірний корок чи гумові прокладки
Овальність труби	Деформація труби гідростатичним тиском в охолоджувальній ванні; деформація труби від стискуючого зусилля тягового пристрою	Посилити охолодження в калібрувальній насадці; понизити температуру розтопу; збільшити тиск стисненого повітря; послабити стискання транспортуючих органів тягового пристрою; посилити охолодження труби чи знизити швидкість процесу
Не витримує труба іспитів внутрішнім гідростатичним тиском	Погана зварюваність окремих потоків розтопу (холодні спаї)	Нанести гвинтову нарізку на дорні і циліндрі головки після дорноутримувача до щілини; підвищити температуру розтопу; зменшити швидкість процесу; встановити головку з більш довгою циліндричною частиною

4.4.8.1. Нанесення полімерної ізоляції

Принципова схема нанесення полімерної ізоляції на кабель наведена на рис.4.92.

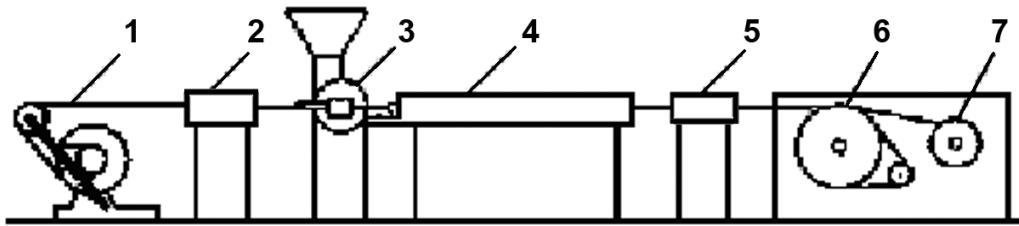


Рис. 4.92. Нанесення ізоляції на кабель:

1 – подавальний пристрій, 2 – попередній підігрів кабелю 3 – екструдер, 4 – охолоджувальна ванна, 5 – випробування на пробій, 6 – кабестан, 7 – приймальний пристрій

Процес нанесення ізоляції здійснюється двома способами. Спосіб визначається формою і розміром дорна, через який неперервно протягується провідник.

В обох випадках використовують кутову головку. Залежно від конструкції дорна існують два способи нанесення ізоляції і, відповідно: два типи ізоляції (рис. 4.93):

1. – кабельна головка напірного типу забезпечує протиток розтопу. Розміщення дорна таке, що він не впливає на центрівку провідника в ізоляції, однак за рахунок тиску протитоку ізоляція міцно облягає провідник;
2. – кабельна головка трубного типу забезпечує добру центрівку провідника в ізоляції, але через те, що дорн не запобігає протитоку, трубна ізоляція не щільно прилягає до провідника (слабке притискання – лише за рахунок усадки).

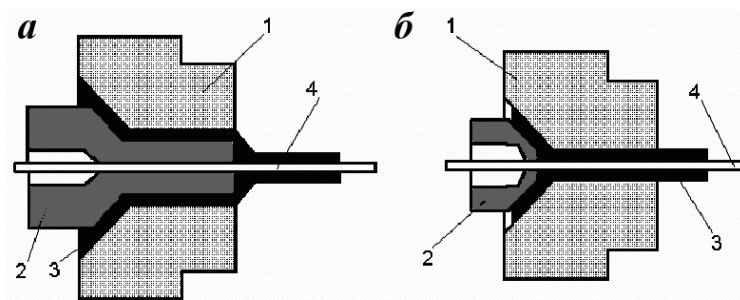


Рис. 4.93. Конструкції кабельної головки: а – напірного типу; б – трубного типу;
1 – корпус головки; 2 – напрямляюча вставка; 3 – розплав полімеру; 4 – дріт кабелю

Для нанесення ізоляції найчастіше використовують поліетилен низької та високої густини. Окрім цього, кабельну ізоляцію виготовляють з пластифікованого полівінілхлориду, як самогасного високоеластичного полімеру. У випадку необхідності створення ізоляції з підвищеною міцністю використовують поліамід 66 (нейлон), який характеризується також підвищеною теплостійкістю.

Для виготовлення ізоляції, як правило, створюють полімерну композицію, котра, крім вихідного полімеру, або суміш полімерів містить антиоксиданти, стабілізатори часто газову сажу, барвник (пігменти), пластифікатори і речовини, які підвищують стійкість матеріалу до розтріскування (наприклад, бутилкаучук).

Для покращення адгезії ізоляції до провідника його попередньо нагрівають до оптимальної температури (наприклад, для ПЕВГ – 176 °С, для ПЕНГ – 115 °С, а для ПВХ – 149 °С).

Екструзію для нанесення ізоляції ведуть при підвищених температурах, які наведені нижче (°С):

ПЕНГ

ПЕВГ	– 260
Поліамід 6,6	– 287
ПВХ - пластифікований	– 187

Нанесення трубної ізоляції ведуть при оптимальному ступені витяжки, який дорівнює відношенню площі поперечного перерізу щілини головки до площі перерізу полімерної ізоляції. При надто великому ступені витяжки утворюється ізоляція з нерівною шорсткою поверхнею і, при цьому, в ізоляції виникають внутрішні напруження.

Нижче наведені оптимальні значення ступеня витяжки:

Поліамід 6,6	– 4,0
ПВХ - пластифікований	– 1,5
ПЕВГ	– 1,2
ПЕНГ	– 1,5

Для нанесення ізоляції найчастіше використовують екструдери з діаметром шнека $38 \div 350$ мм і продуктивністю $4,5 \div 450$ кг/год. Покриття наноситься на провідники з діаметром від 0,2 мм до 127 мм. Швидкість відведення кабелю при екструзії залежить від діаметру провідника і змінюється від 1200 м/хв до $6 \div 30$ м/хв. Найменші значення – для тяжких кабелів великого діаметру.

4.4.9. Аутогермічна екструзія

Потік тепла, який генерується за рахунок внутрішнього тертя полімерного матеріалу (порошок, гранули) в пластикаційному вузлі може бути достатнім для перебігу екструзії без додаткового зовнішнього нагрівання циліндра. Така екструзія називається аутогермічною чи аутогенічною. Основи такого процесу розробив J. M. Mc-Kelvey в 1953-54 роках, а перший екструдер був сконструйований в 1965 р. Е. Бексмом.

Засадничою проблемою аутогермічної екструзії є генерування тепла за рахунок внутрішнього тертя полімерної сировини.

В матеріалі, який переміщується в площині $y-z$ каналу шнеку виникає тепловий потік \dot{q}_{y-z} (Вт/м²) за рахунок внутрішнього тертя. Це тепло можна визначити з залежності:

$$\dot{q}_{y-z} = \eta \cdot \left(\frac{dV_z}{dy} \right)^2, \quad (4.106)$$

де: η – динамічна в'язкість полімерного матеріалу; $\frac{dV_z}{dy}$ – швидкість зсуву.

Ця залежність може бути використана з достатнім наближенням у вигляді:

$$\dot{q}_{y-z} = \eta \cdot \left(\frac{V_z}{h} \right)^2, \quad (4.107)$$

де: h – глибина гвинтового каналу шнеку.

Кількість тепла, яке виділяється при цьому можна розрахувати, помноживши \dot{q}_{y-z} на об'єм каналу шнеку, який при умові постійного ширини каналу (b) і глибини (h) дорівнює:

$$V_s = \frac{L}{\sin \alpha_s}, \quad (4.108)$$

де: L – довжина шнеку; α_s – кут нахилу гвинтової нарізки.

Тоді кількість тепла дорівнює:

$$\dot{Q}_{y-z} = \frac{\eta \cdot V_z^2 \cdot L \cdot b}{h \cdot \sin \alpha_s}, \quad (4.109)$$

А прийнявши, що $V_z = \pi \cdot D_s \cdot v \cdot \cos \alpha_s$, отримаємо:

$$\dot{Q}_{y-z} = \frac{\pi^2 \cdot v^2 \cdot \eta \cdot D_z^2 \cdot L \cdot b \cdot \cos^2 \alpha_z}{h \cdot \sin \alpha_z}, \quad (4.110)$$

тут v – лінійна швидкість шнеку (обертova швидкість).

Або вираз кількості тепла можна представити через напруження зсуву:

$$\dot{Q}_{y-z} = \frac{\pi \cdot v \cdot \tau_s \cdot D_z \cdot L \cdot h}{\sin \alpha_z}, \quad (4.111)$$

Об'ємний тепловий промінь виникає також і в площі $x - y$ каналу шнеку. Отже, сумарне напруження теплового потоку в пластикаційному вузлі винесе:

$$\dot{q}_w = \dot{q}_{y-z} + \dot{q}_{x-y}, \quad (4.112)$$

А повний тепловий потік від внутрішнього тертя становить:

$$\dot{Q}_w = \dot{Q}_{y-z} + \dot{Q}_{x-y}, \quad (4.113)$$

Окрім того, матеріал нагрівається і за рахунок тертя зовнішнього – до стінок шнеку і циліндра. На загал, щоби досягнути необхідного для топлення матеріалу тепла, обертova швидкість шнеку повинна бути досить великою і знаходитись в межах $10 \div 17 \text{ c}^{-1}$, що відповідає лінійній швидкості до 1,5 м/с. В зв'язку з тим екструдери такого типу називають швидкохідними. Висока швидкість обумовлює високий обертovий момент шнеку і, як наслідок, – значне, в основному, зсувне напруження в ньому, яке може перевищити витривалість на кручення. Щоби запобігти цьому використовують короткий шнек з відношенням L/D до 18 і привід під'єднують зі сторони вищої витривалості шнеку, а саме – зі сторони зони дозування, зворотній кінець шнеку закріплюють у підшипнику.

При такому процесі екструзії виникають труднощі у контролі і регулюванні теплового потоку вздовж вузла пластикації, що призводить до погіршення якості екструдату і звужує асортимент перероблюваних таким чином матеріалів, виходячи із їх стійкості до термомеханодеструкції. При такому методі є обов'язковим встановлення відповідної швидкості обертання шнеку для кожної партії одного і того ж матеріалу, що утруднює узгодження процесу екструзії з іншими елементами і вузлами технологічної лінії виготовлення виробу. Тому такий метод не знайшов широкого використання, і відома лише лінія для формування поліетиленової плівки екструзією з роздуванням рукава.

4.4.10. Поршнева (плунжерна) екструзія

Такий метод є придатний до формування виробів з політетрафторетилену (ПТФЕ). ПТФЕ характеризується надзвичайно вузьким температурним інтервалом між температурою розкладу і температурою топлення, підвищеною в'язкістю при температурі топлення ($10^{10} \div 10^{11} \text{ Па}\cdot\text{с}$ при температурі $327 \pm 10^\circ\text{C}$), а також високою чутливістю на дію напружень зсуву та стискання, а також схильністю до агломерування під час руху грануляту в гвинтовій нарізці. Ці вади не дозволяють переробляти ПТФЕ методом шнекової екструзії.

Плунжерна екструзія (рис. 4.94) полягає у тому, що віддозована сировина, яка знаходиться в засипному бункері (1) подається за допомогою вібраційного жолоба (2), роздільної тарілки (3) і засипної лійки (4) в стальний циліндр (7). В циліндрі здійснюється ущільнення порошку за допомогою пуансона (5), який виконує поступально-зворотні рухи. У випадку виготовлення труб пуансон пересувається по центральному стержню (6) за допомогою гідравлічного приводу (11).

Внаслідок цього ущільнений матеріал перетискається у зону нагрівання циліндра (7), що оснащений нагрівними елементами (8), які розміщені на алюмінієвій трубі (10). В зоні 7 відбувається спікання матеріалу і його монолітизація, а також з'єднання з попередньою заготовкою, виготовленою у попередньому циклі.

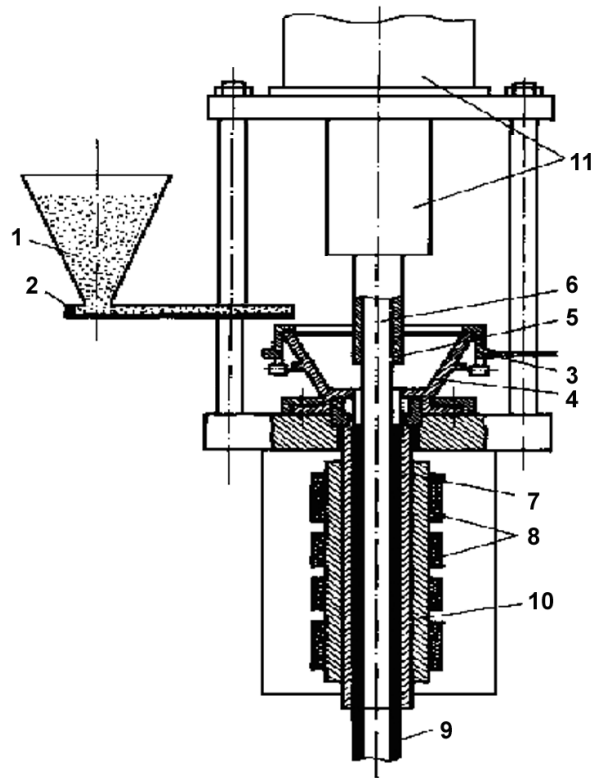


Рис. 4.94. Схема поршневого „шприцпресу” для формування труб з ПТФЕ

Після закінчення циклу пуансон повертається у верхнє вихідне положення і починається наступний цикл від початку. Заготовка з циліндру витискається у вигляді труби через екструзійну головку.

Тиск на пуансоні, який сприяє ущільненню матеріалу і пересуванню його в напрямку нагрівного циліндру, лежить в межах $2 \div 3$ МПа при виготовленні прутків великих діаметрів і $60 \div 80$ МПа при формуванні тонкостінних труб. Надто високий тиск руйнує когезійне з'єднання елементів. Швидкість стискання впливає на тиск, який зростає з підвищенням швидкості руху пуансона. Однак швидкість руху обмежується довжиною зони нагрівання і площею перетину заготовки, яка формується. Для визначення максимальної швидкості використовують залежність:

$$v = 2 \cdot 10^6 \frac{L}{D^{5/3}}, \quad (4.114)$$

де: L – довжина прутка, м; D – діаметр прутка, м.

При формуванні труби ця залежність приймає вигляд:

$$V = 2 \cdot 10^6 \frac{L}{D_u^{5/3} - D_c^{5/3}}, \quad \text{м/с} \quad (4.115)$$

де: D_u – внутрішній діаметр циліндра, м; D_c – діаметр центрального стержня, м.

Температура циліндра, на загал, знаходиться в інтервалі $340 \div 400$ °С. Чим нижча температура, тим нижча швидкість екструзії і довший час перебування заготовки в нагрівному циліндрі. Час нагрівання (спікання) визначається з залежності:

$$\tau_{\min} = \frac{L}{V_{\max}}, \quad (4.116)$$

Але, одночасно, час залежить і від діаметру заготовки:

$$\tau_{\min} = 5 \cdot 10^5 \cdot D^{5/3}, \quad (4.117)$$

Циліндр складається з трьох частин: зона нагрівання і стискання, зона спікання і зварювання з попередньою заготовкою і зона без нагрівання. Довжина L приймається відповідно до довжини зони нагрівання і спікання.

В таблиці 4.23 приведена залежність фізико-механічних властивостей виробу від умов формування.

Таблиця 4.23

Вплив умов формування на фізико-механічні властивості трубок з ПТФЕ суспензійного ($d_z = 11,7$ мм; $d_{\text{вн}} = 9,7$ мм)

Умови екструзії		Властивості трубки	
Температура, °С	Час, хв	R_r , МПа	ε , %
380	10,8	17,6	282
	22,3	19,7	341
	34,1	21,6	333
385	10,8	21,2	305
	22,3	24,2	363
	34,1	25,7	346
390	10,8	23,8	317
	22,3	25,8	353
	34,1	26,3	365
400	10,8	24,8	343
	22,3	25,4	379
	34,1	22,4	328

Методом плунжерної екструзії виготовляють прутки діаметром до 80 мм і труби з зовнішнім діаметром до 300 мм і товщиною стінки від 0,1 до 4 мм, а також профілі різного типу. При витисканні паст на основі порошку ПТФЕ під тиском $3 \div 10$ МПа отримують шnurки, котрі після вальцювання утворюють ущільнюючі стрічки.

Умови екструзії та форма виробу залежить від типу сировини, наприклад, вони різні для ПТФЕ емульсійного і суспензійного.

4.4.11. Екструзія зі спінюванням

При екструзії зі спінюванням одержують пористий (газонаповнений) виріб. Екструдат може бути суцільно газонаповнений, або ж мати порувату серцевину з монолітною оболонкою. Утворення газу під час переробки забезпечується внаслідок додавання до сировини пороутворювачів (легкокипляча рідина, порошок порофору тощо), або ж при введенні у розтоп інертного газу. Пороутворювачі переходять у газ або ж утворюють його при визначених умовах переробки.

Газ чи рідина вводяться у сировину під тиском на спеціальному обладнанні або ж безпосередньо у зоні дозування екструдера під час екструзії. Натомість тверді порофори і деякі рідини вводяться у сировину при їх синтезі. Порофор проходить ці ж самі стадії, що і полімер – транспортування, ущільнення, нагрівання, топлення перед утворенням газу. При досягненні певної температури в зоні дозування утворюється газ, який швидко розчиняється у розтопі внаслідок великого тиску і розвинутої поверхні. Саме тому не рекомендується використовувати шнеки з дегазацією каналу. Січення щілини головки повинно бути меншим, у порівнянні з розміром формованого виробу, з урахуванням спінювання, яке спостерігається при виході з головки. Збільшення розміру обумовлене додатково ефектом Баруса. Січення каналів в головці повинно бути великим, щоби запобігти значному спадові тиску, а довжина

щілини мала зі значним зменшенням тиску. Тиск в розтопі відчутно зростає в зоні дозування і різко спадає у щілині головки (рис. 4.95).

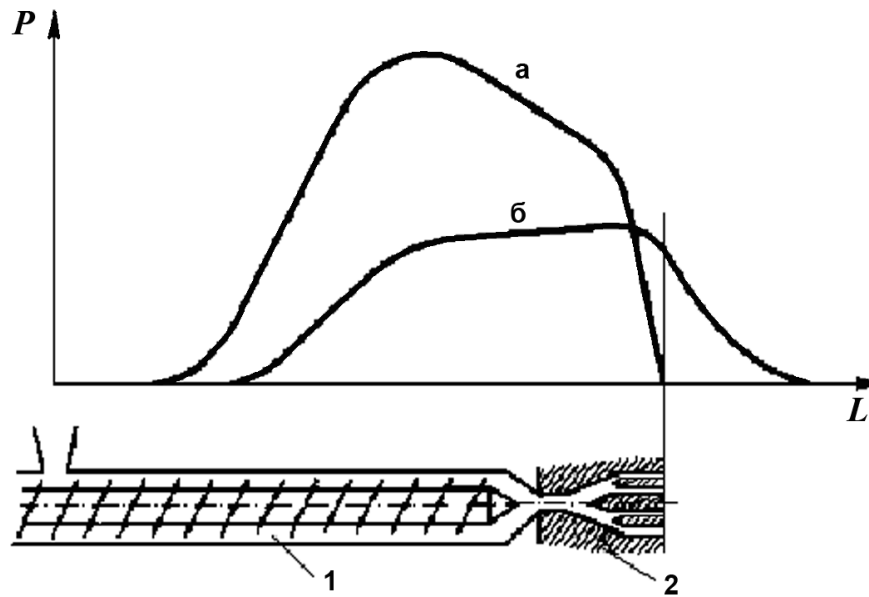


Рис. 4.95. Зміна тиску в полімері (а) і тиску газу (б) вздовж пластикаційного циліндра (1) і сопла (2)

Водночас тиск газу зростає в меншій мірі у зоні дозування але починає різко спадати лише після виходу з щілини.

Властивості виробу залежать не тільки від типу полімеру і порофору та його кількості і доданків але також від умов переробки. Залежність цю можна прослідкувати, аналізуючи рис. 4.96.

Полімер на виході із щілини головки ще не є стабільним і міцним, тому за рахунок напруження на межі полімер - газ і дифузії зменшується число пор, які збільшуються у розмірах. Тому екструдат потрібно якнайшвидше охолодити до склоподібного або витривалого еластичного твердого стану.

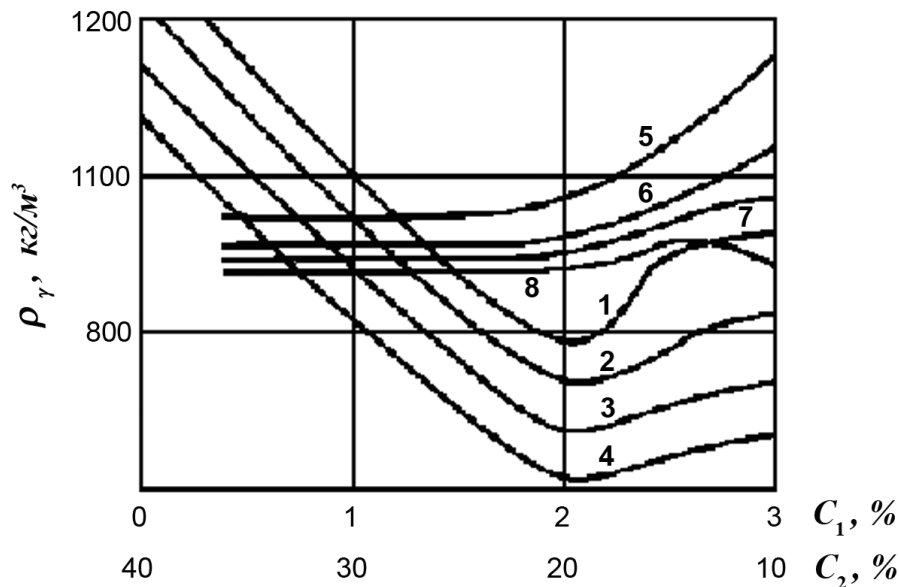


Рис. 4.96. Залежність умовної густини (ρ_g) ПВХ від вмісту (c_1) порофору (1 ÷ 4) і вмісту (c_2) пластифікатора (5 ÷ 8) при різних швидкостях обертання шнека:

1 – 29 c^{-1} ; 2 – 52 c^{-1} ; 3 – 87 c^{-1} ; 4 – 94 c^{-1} ; 5 – 50 c^{-1} ; 6 – 60 c^{-1} ; 7 – 70 c^{-1} ; 8 – 80 c^{-1} ;

1 ÷ 4 – $D = 35$ мм, 5 ÷ 8 – $D = 20$ мм

Потрібно зауважити, що спінений матеріал охолоджується повільніше, ніж монолітний матеріал за рахунок нижчої теплопровідності.

Для одержання виробу з монолітною оболонкою створюють умови екструзії з калібруванням при інтенсивному охолодженні зовнішньої поверхні, що запобігає пороутворенню у шарі, в якому швидко наростає в'язкість і відбувається різка зміна фізичного стану. Одержані вироби мають підвищену міцність і їх можна зарахувати до конструкційних виробів. Інший метод формування конструкційних пористих виробів є ко-екструзія.

Екструзією із спінюванням переробляються, в основному, термопласти. Залежно від умовної густини виробу ділять на: конструкційні $\rho_n \geq 400 \text{ кг/м}^3$, напівконструкційні з $\rho_n \leq 400 \text{ кг/м}^3$ і неконструкційні з $\rho_n \leq 100 \text{ кг/м}^3$. Таким методом можна одержати виріб з різним ступенем спінення, аж до утворення структурованої піни, наприклад, ПТФЕ може бути спінений навіть за рахунок розділення газу окремих фібрил. Такі вироби широко застосовують у медицині.

Цікавий ефект спостерігається при екструзії ПЕ зі спінюванням разом із зшиванням ланцюгів. Відзначається, що у цьому випадку на відносну густину матеріалу не впливає тип зшиваючого агенту до зшивання.

4.4.12. Ко-екструзія

Сучасні технічні і екологічні вимоги ставлять перед виробництвом завдання виготовлення виробів, в т.ч. екструзійних, багатошарових – таких, які складаються з декількох полімерів різних за властивостями, структурою, кольором, тощо, або ж з одного полімеру, який відрізняється структурою чи кольором.

Такі вироби виготовляються ко-екструзією. Принцип ко-екструзії полягає в тому, що формування багатошарового екструдату відбувається за допомогою багатьох екструдерів (кількість відповідає кількості шарів) і однієї спільної екструзійної головки. Ко-екструзія є відома від 1967 року і сьогодні розвивається дуже інтенсивно.

Екструдовані потоки різних полімерів з'єднуються в екструзійній головці і в щілині течуть спільно з'єднаним потоком. У випадку прямокутного січення щілини, яка має висоту h і ширину b , прийнято, що полімер 1 з'єднується по площинні з полімером 2 при ламінарній течії (рис.4.97). Використовуючи позначення приведені на рис. 4.97, можна записати:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}, \quad (4.118)$$

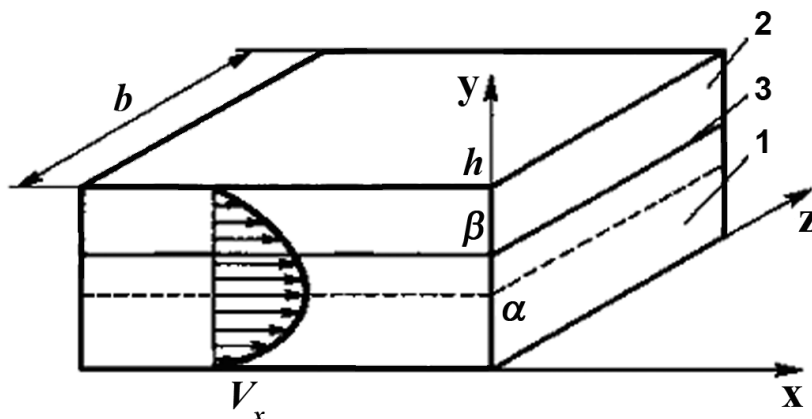


Рис. 4.97. Ламінарний потік ко-екструзійних полімерів (1) і (2) в щілині прямокутного перерізу з висотою h і шириною b ; 3 – площина з'єднання потоків, α – координата на осі y , де проявляється найвища швидкість V_x в напрямку осі x ; β – координата на осі y площини з'єднання потоків

Позначивши градієнт тиску $\frac{\partial P}{\partial x} = -\xi$ і потім інтегруючи рівняння 4.118, отримуємо для полімеру 1:

$$\tau_{yx_1} = -\xi(y - c_1) \quad \text{для } 0 \leq y < \beta, \quad (4.119)$$

аналогічно для полімеру 2:

$$\tau_{yx_2} = -\xi(y - c_2) \quad \text{для } \beta \leq y < h, \quad (4.120)$$

де: c_1 і c_2 – сталі інтегрування.

Коли відношення δ/h є досить великим, то течія відбувається тільки в напрямку осі x , тобто є прямолінійною. Тоді:

$$V_{x_1} = V_{x_1}(y), \quad V_{z_1} = V_{y_1} = 0, \quad \text{а також } V_{x_2} = V_{x_2}(y), \quad V_{z_2} = V_{y_2} = 0, \quad (4.121)$$

а граничні умови мають вигляд:

$$V_{x_1} = 0 \quad \text{для } y = 0 \quad \text{і } V_{x_2} = 0 \quad \text{для } y = h, \quad (4.122)$$

$$V_{x_2} = V_{x_2} \quad \text{для } y = \beta, \quad \text{а також } \tau_{yx_1} = \tau_{yx_2} \quad \text{для } y = \beta, \quad (4.123)$$

Представляючи приведені залежності у рівняння 4.119 і 4.120, отримаємо:

$$\tau_{yx_1} = \xi(y - c) \quad \text{для } 0 \leq y < \beta, \quad (4.124)$$

а для потоку 2:

$$\tau_{yx_2} = \xi(y - c), \quad \text{для } \beta \leq y \leq h \quad (4.125)$$

де: $c = c_1 = c_2$.

Приймаючи, що розтопи полімерів 1 і 2 відповідають ступеневій моделі, можна написати для полімеру 1:

$$\tau_{yx_1} = k_1(\dot{\gamma}_1)^n, \quad (4.126)$$

де швидкість зсуву:

$$\dot{\gamma}_1 = \frac{\partial V_{x_1}}{\partial Y} \quad \text{для } 0 \leq y \leq \alpha, \quad (4.127)$$

$$\dot{\gamma}_1 = -\frac{\partial V_{x_2}}{\partial Y} \quad \text{для } \alpha \leq y \leq \beta \quad (4.128)$$

Аналогічно для полімеру 2:

$$\tau_{yx_2} = k_2(\dot{\gamma}_2)^{n_2}, \quad (4.129)$$

$$\dot{\gamma}_2 = -\frac{\partial V_{x_2}}{\partial Y}, \quad \text{для } \beta \leq y \leq h \quad (4.130)$$

В рівняннях k_1 і k_2 представляють коефіцієнти в'язкості розтопу.

Швидкість зсуву $\dot{\gamma}_1$ змінює свій знак для $y = \alpha$, що відповідає умові, коли швидкість зсуву є найвища, а градієнт швидкості $\partial V / \partial Y = 0$.

Порівнюючи рівняння 4.119 і 4.126, можна записати:

$$\dot{\gamma}_1 = \left[-\frac{\xi(y - c)}{k_1} \right]^{\frac{1}{n}}, \quad (4.131)$$

Щоби визначити швидкість V_{x_1} , потрібно залежність 4.127 записати у вигляді $\partial V_{x_1} = \dot{\gamma}_1 \partial Y$ і інтегрувати в границях від 0 до y , а потім, підставляючи залежність 4.131 і виконуючи декілька перетворень, отримаємо:

$$V_{x_1}(y) = \frac{k_1}{\xi} \frac{n_1}{n_1 + 1} (\dot{\gamma}_{01}^{n_1+1} - \dot{\gamma}_1^{n_1+1}), \quad (4.132)$$

де:

$$\dot{\gamma}_{0_1} = \dot{\gamma}_{1|_{y=0}} = \left(\frac{\xi_c}{k_2} \right)^{\frac{1}{n_1}}, \quad (4.133)$$

Умова 4.132 виконується у випадку, коли $0 \leq y \leq \beta$ для

$$\dot{\gamma}_{0_1} = \dot{\gamma}_{1|_{y=0}} = \left(\frac{\xi_c}{k_2} \right)^{\frac{1}{n_1}}, \quad (4.134)$$

Аналогічно визначають швидкість V_{x_2} для полімеру 2:

$$V_{x_2}(y) = \frac{k_2}{\xi} \frac{n_2}{n_2 + 1} (\dot{\gamma}_{2h}^{n_2+1} - \dot{\gamma}_2^{n_2+1}), \quad (4.135)$$

де:

$$\dot{\gamma}_{2h} = \dot{\gamma}_{2|_{y=h}} = \left(\frac{\xi(h-c)}{k_2} \right)^{\frac{1}{n_2}}, \quad (4.136)$$

Умова (4.135) виконується при $\beta \leq y \leq h$ для:

$$\dot{\gamma}_2 = \left[-\frac{\xi(y-c)}{k_2} \right]^{\frac{1}{n_2}}, \quad (4.137)$$

Стала c рівнянь 4.133 і 4.136 визначається при використанні граничних умов, позначених у рівнянні 4.122.

Здійснюючи ряд перетворень отриманих рівнянь, можна записати основне рівняння руху двох потоків у щілині при ко-екструзії:

$$\frac{n_1}{n_1 + 1} \left(\frac{\xi}{k_1} \right)^{\frac{1}{n_1}} \cdot \left[c^{\frac{(n_1+1)}{n_1}} - |c - \beta|^{(n_1+1)/n_1} \right] - \frac{n_2}{n_2 + 1} \left(\frac{\xi}{k_2} \right)^{\frac{1}{n_2}} \cdot \left[|h - c|^{(n_2+1)/n_2} - |\beta - c|^{(n_2+1)/n_2} \right] = 0, \quad (4.138)$$

Для розв'язку за методом наближень і селекції рівняння 4.138 потрібно зняти k_1 і k_2 , n_1 і n_2 , ξ , β і h .

На рис. 4.98 зображені профілі швидкості течії при ко-екструзії ПП і ПС через прямокутну щілину головку при різних градієнтах тиску $\partial P / \partial X$ (величини приведені над кривими) і однакових значеннях β_1 , а також різних значеннях β_1 і β_2 .

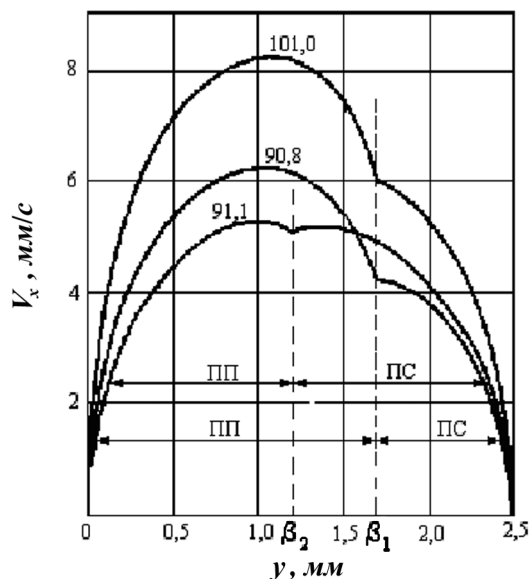


Рис. 4.98. Профілі швидкостей течії в щілині протягом ко-екструзії ПП і ПС

Під час течії через щілину розтоп з меншою в'язкістю має кращу змочуючу здатність до стінок головки і, крім того, охоплює в'язкіший розтоп другого полімеру.

У випадку прямокутної щілини теоретична площина з'єднання фаз є прямолінійною, а реальна має змінну форму (рис. 4.99).

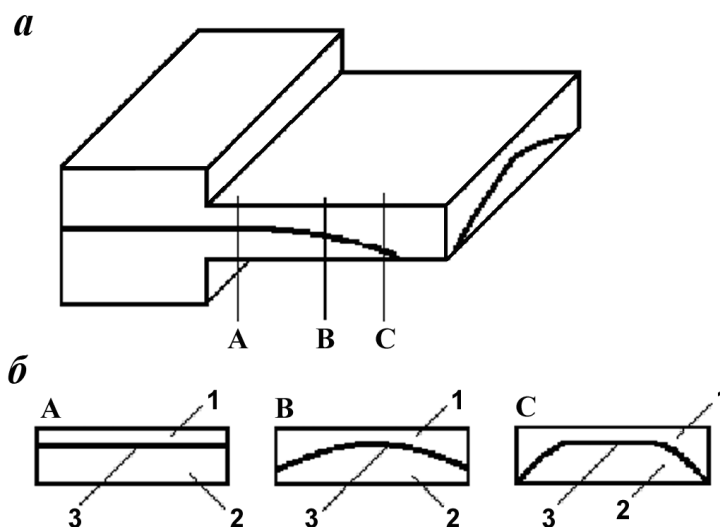


Рис. 4.99. Потік розтопу прямокутного профілю через щілину:

1 – полімер з нижчою в'язкістю; 2 – полімер з вищою в'язкістю; 3 – поверхня зливання потоків;
A, B, C – переріз щілини за збільшенням віддалі від входу у щілину

Профіль з'єднувального шару змінюється від плоского до випуклого. При екструзії через щілину круглого профілю з'єднувальний шар переходить від плоского до еліпсоїдного у випадку паралельності потоків. Коли ж здійснюється співосьова екструзія, профіль потоків не змінюється (рис. 4.100).

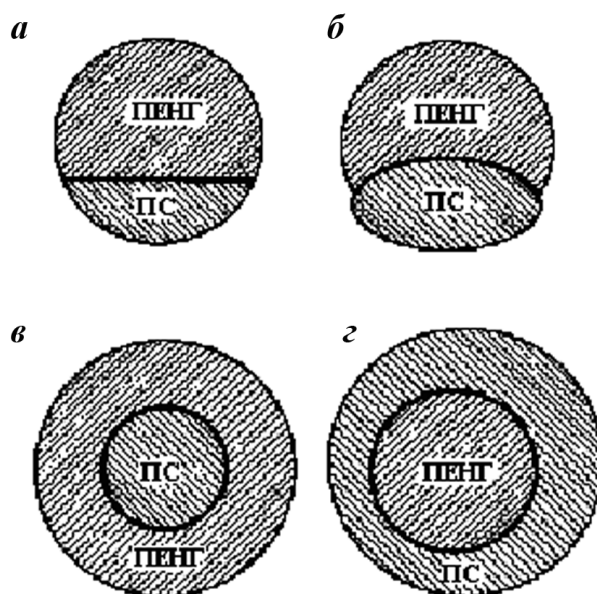


Рис. 4.100. Переріз потоків ПЕ і ПС під час течії через щілину круглої форми:

а) на вході у щілину; б) на виході з щілини; в) співвісність по всій довжині щілини;
г) зміщення осей потоків на виході з щілини

Для аналізу конструкції головки при ко-екструзії розглянемо два конкретних приклади.

1. Формування листів віконних. Вони виготовляються з профілю відформованого методом ко-екструзії з двох матеріалів – штивного ПВХ і пластикату (рис. 4.101).

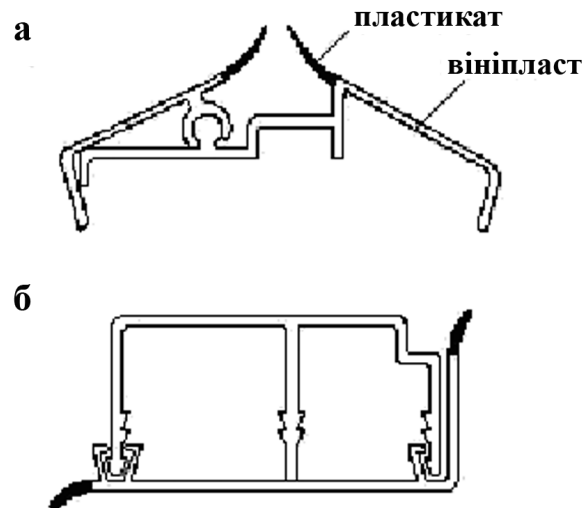


Рис. 4.101. Приклади профілів віконних рам з ПВХ (вініпласту і пластикату)

ПВХ жорсткий становить несучу конструкцію, а пластикат використовується для ущільнюючих елементів. Для формування таких профілів використовується головка, конструкція якої схематично зображена на рис. 4.102 і 4.103.

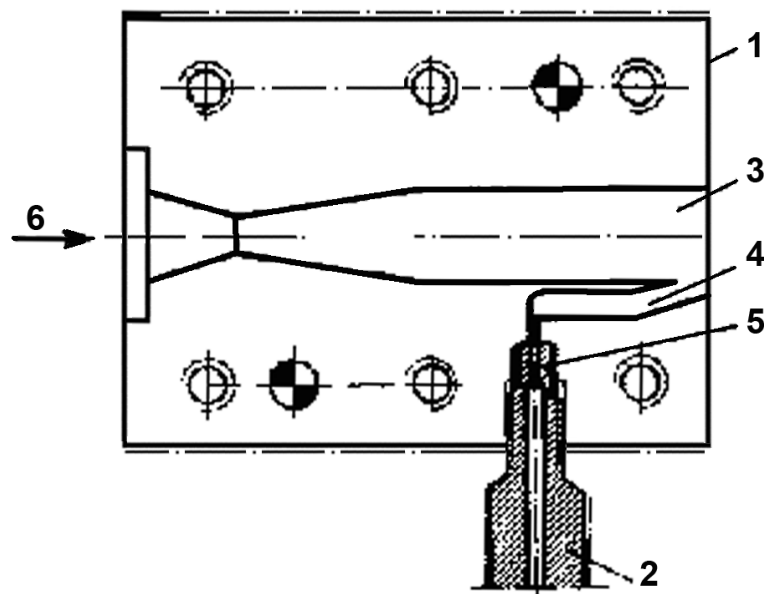


Рис. 4.102. Схема екструзійної головки для ко-екструзії вініпласту і пластикату:

1 – головка для екструзії вініпласту; 2 – головка для екструзії пластикату;

3 – проточний канал для вініпласту; 4 – канал для протікання пластикату;

5 – повітряна ізоляція; 6 – загальний напрям екструзії

2. Другий приклад – формування багатошарової плівки, в якій зовнішні шари виготовляють з інертного і стійкого матеріалу, а внутрішні шари виконують функції несучої частини і бар'єру для дифузії кисню (витривалий, міцний шар). Середній шар використовується для потовщення плівки і формується з найдоступнішого, дешевого полімеру, в т.ч. з вторинної сировини. Для формування багатошарових плівок використовуються головки, конструкція котрих залежить від складу і призначення плівки (рис. 4.104).

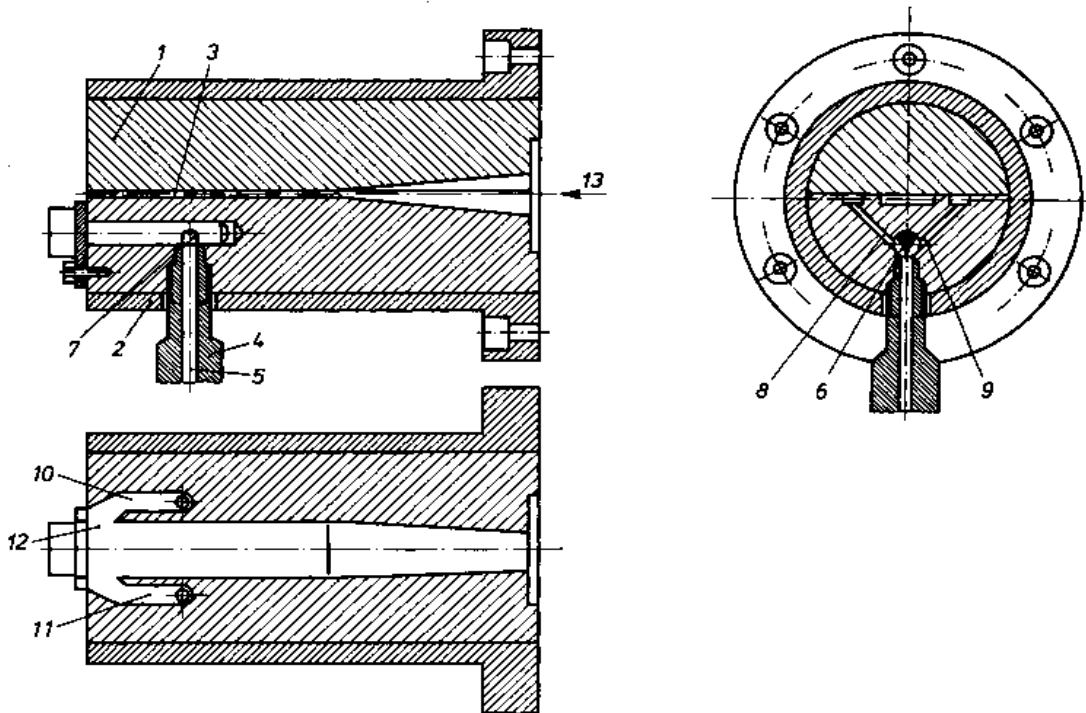


Рис. 4.103. Екструзійна головка для одного потоку з вініласту і 2-х потоків з пластикату:
 1 – корпус головки для вініласту; 2 – втулка ливникова для вініласту; 3 – канал; 4 – корпус головки для екструзії пластикату; 5 – канал для течії вініласту; 6 – обертовий шток для розділення потоків, через оберт якого відбувається зміна співвідношення інтенсивності обох потоків;
 7 – рівці на штоку; 8, 9 – канали для розподілу потоків пластикату до бічних каналів;
 10, 11 – бічні канали; 12 – область з'єднання потоків; 13 – напрям екструзії

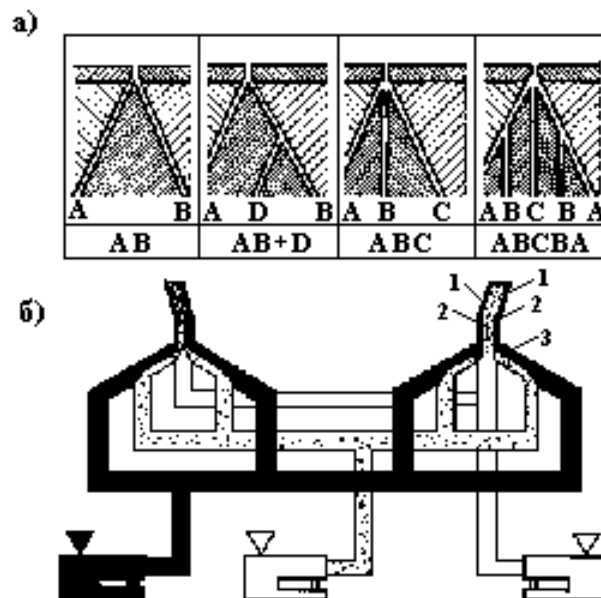


Рис. 4.104. Основні способи з'єднання потоків в головці при ко-екструзії:
 а) індивідуальні канали для течії розтопів окремих полімерів А, В, С, D; б) одночасна ко-екструзія двох виробів триверстових (трискладникових) при використанні двох головок і трьох екструдерів

4.5. Технологія формування погонажних виробів методом вальцювання та каландрування

4.5.1. Загальні поняття

Вальцювання та каландрування – важливі методи виготовлення виробів з пластмас на обладнанні валкового типу. Вальці використовувались ще у минулому столітті для переробки гумових сумішей. Зараз валкові машини використовують для одержання листів і плівок з вініласту, полівінілхлоридного пластикату, у виробництві ацетилцелюлозних етролів, фенольних прес-матеріалів. Схеми вальцювання і каландрування наведено на рис. 4.105.

Суть процесу вальцювання (рис. 4.105, а) полягає у багаторазовому пропусканні із стисканням матеріалу через щілину між нагрітими металевими валками, які обертаються назустріч один одному. Під дією підвищеної температури і значних механічних зусиль у щілині між валками матеріал деформується, пом'якшується, зміщується і гомогенізується. При цьому його стискання супроводжується деформацією зсуву (див. розділ 2.6.2). При вальцюванні відбувається пластикація матеріалу – різке збільшення його пластичності за рахунок топлення та деякого зменшення молекулярної маси внаслідок механодеструкції, викликаної великими напруженнями зсуву.

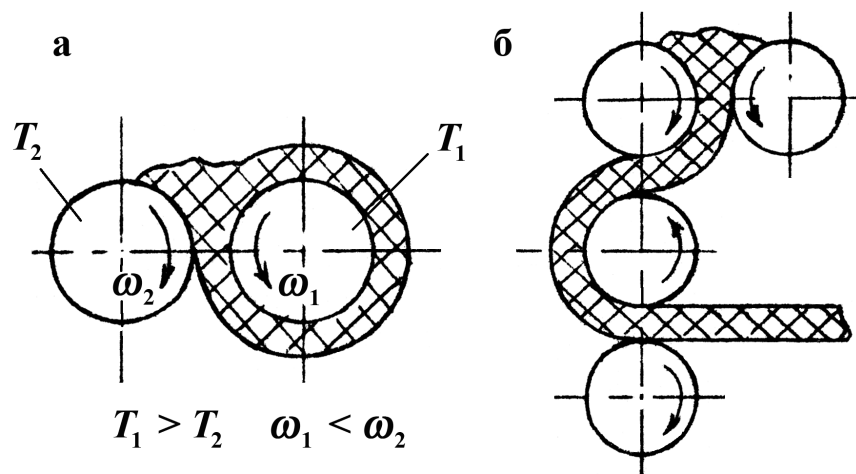


Рис. 4.105 Схема вальцювання (а) і каландрування (б)

Залежно від температури вальцювання макрорадикали, що утворюються в результаті механо-хімічних процесів, можуть або дезактивуватися, що призведе до зниження молекулярної маси полімеру, або рекомбінувати, даючи блок- і прищеплені ко-полімери. Це явище широко використовується в технології переробки пластмас.

Процес вальцювання використовують для змішування інгредієнтів з полімерами, суміщення полімерів з пластифікатором, для одержання листів і плівок, для підігріву і пом'якшення готових полімерів, для одержання блок- і прищеплених ко-полімерів.

Для збільшення інтенсивності деформування валки обертаються з різними швидкостями. При цьому швидкість обертання заднього валка ω_2 більша від швидкості обертання переднього (робочого) валка ω_1 . Відношення ω_2/ω_1 називається коефіцієнтом фрикції, або просто фрикцією. Здебільшого величина коефіцієнта фрикції становить $1,1 \div 1,4$. Вальці можуть працювати в періодичному чи безперервному режимі.

Каландрування – це технологічний процес одержання плаского неперервного полотна (плівка чи лист) потрібної товщини і ширини, який полягає у деформації розтопу полімеру в калібрувальному зазорі заданої висоти між валками, які обертаються попарно назустріч. Метод найбільш широко використовують при виготовленні лінолеуму на основі композицій

з ПВХ, плівок і листів каліброваної товщини з непластифікованого і пластифікованого ПВХ, поліетилену, для виготовлення дубльованих матеріалів.

4.5.2 Технологія та умови каландрування

Технологія каландрування складається з таких стадій:

- підготовка композиції, чи одержання напівфабрикату листа, або плівки екструзійним, чи валковим методом;
- нагрівання і формування полотна;
- охолодження полотна;
- намотування в рулон, чи нарізання на стрічки, або шматки.

Один з варіантів процесу схематично наведені на рис. 4.106.

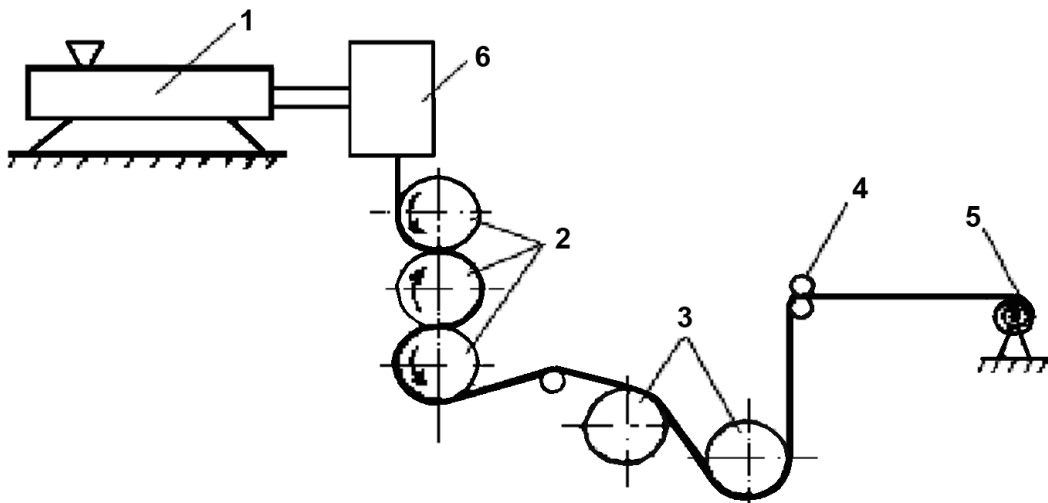


Рис. 4.106 Схема лінії формування плівки методом каландрування:

1 – екструдер; 2 – валки каландра; 3 – охолоджувальні валки; 4 – тяговий пристрій;
5 – намотувальний пристрій; 6 – екструзійна головка

На відміну від вальцювання при каландруванні полімерний матеріал проходить через зазор тільки один раз. Щоб одержати плівку каліброваної товщини, він повинен пройти декілька зазорів, утворених валками каландра. Тому каландри мають три і більше валків (найпоширенішими є чотиривалкові каландри з L-, Г-, чи Z-подібним розташуванням валків). Валки обертаються зі значно вищою швидкістю, ніж при вальцюванні.

У щілину першої пари валків каландра подається гарячий гомогенізований і пластифікований матеріал (рис. 4.105, б). Вздовж поверхні валків шари матеріалу рухаються зі швидкістю, що дорівнює лінійній швидкості валків. Внутрішні ж шари матеріалу на початку руху підлягають дії сил виштовхування, а потім втягуються в щілину між валками за рахунок сил тертя. Різниця швидкостей окремих шарів матеріалу викликає деформацію зсуву та поліпшує пластикацію матеріалу. При наближенні до зазору швидкість середніх шарів різко збільшується і в момент його проходження досягає максимального значення, а потім зменшується і спадає до швидкості валків.

Отже, течія розтопу в міжвалковому зазорі відбувається зі змінною швидкістю і із змінним градієнтом тиску. Це можна простежити з рис. 4.107.

Така велика зміна швидкості течії по глибині каналу викликає розвиток високих напружень зсуву, що, з одного боку, поліпшує гомогенізацію, але з другого – при високій частоті обертання валків, напруження зсуву обумовлює сильну орієнтацію макромолекул у напрямку течії. Цей ефект підсилюється ще й тим, що температура розтопу на валках

невисока (розглянемо нижче), і після каландра розтоп швидко охолоджується на валках (3), через це релаксація напружень є малоймовірною.

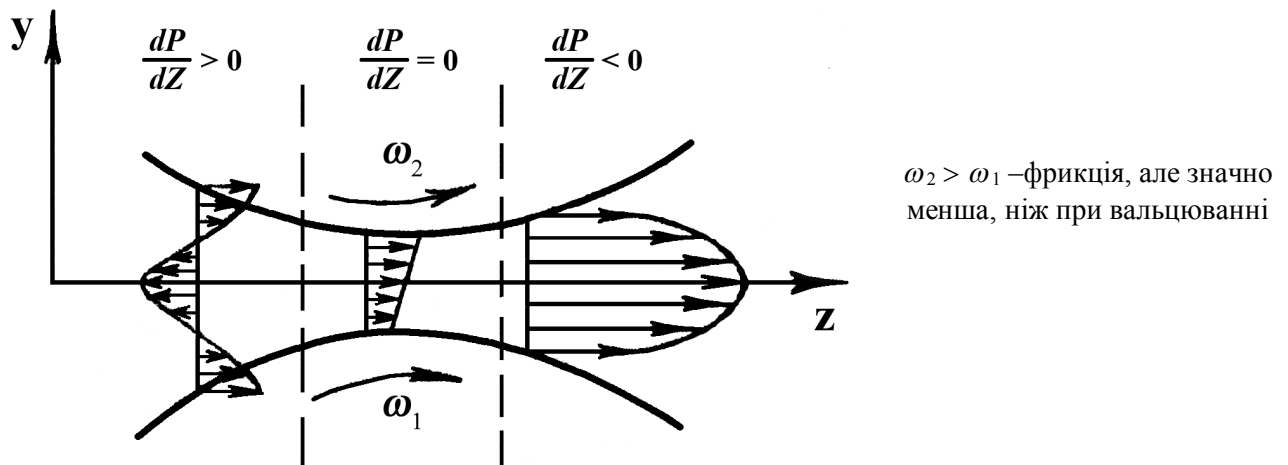


Рис. 4.107 Епюри швидкостей течії в міжвалковому просторі

Отже, спрямована течія полімерного розтопу з високою в'язкістю при проходженні по валках каландра призводить до орієнтації макромолекул у напрямку каландрування. Це є причиною анізотропії механічних властивостей і усадки готової плівки: міцність плівки і усадка в поздовжньому напрямку (в напрямку каландрування) є вищими, ніж у поперечному. Це явище має назву „каландровий ефект” і для плівки є небажаним. Попередньою пластикацією маси і підвищенням температури валків зменшують каландровий ефект і вплив високоеластичної деформації при формуванні плівок методом каландрування.

4.5.2.1 Особливості режиму каландрування

Температура валків каландра значно впливає на якість виробу. Вона найперше визначає ступінь орієнтації полімерів – чим вища температура, тим менший ступінь орієнтації. Однак технологічно температура визначається умовами зняття плівки з валка каландра. Встановлюється така температура, за якої було б відсутнє прилипання плівки і полотно зберігало б надану йому форму і товщину. Це можливе, цілком зрозуміло, при температурі валка, близькій до температури текучості полімеру (T_m). Потрібно пам'ятати, що внаслідок великих напружень зсуву в'язкої течії в міжвалковому зазорі спостерігається дисипація енергії в об'ємі розтопу. Внаслідок цього матеріал додатково розігрівається. При русі розтопу в міжвалковому зазорі виникає радіальний тиск через в'язкопружні властивості розтопу полімеру. Цей тиск тим вищий, чим вищими є в'язкість розтопу і швидкість обертання валків.

Тиск в міжвалковому зазорі можна розрахувати з залежності, яку запропонував Ардичвілі:

$$P = 4 \cdot \mu \cdot V \cdot \frac{\sqrt{r(h-h_0)}}{h^2}, \quad (4.139)$$

А розпірне зусилля вираховується з рівняння:

$$F = 2 \cdot \mu \cdot V \cdot r \cdot L_p \cdot \left(\frac{1}{h_0} - \frac{1}{H} \right), \quad (4.140)$$

В цих рівняннях: μ – в'язкість розтопу полімеру; V – об'ємний розхід матеріалу, який проходить через міжвалковий простір за одиницю часу; r – радіус валка; h_0 – висота зазору в

центрі валків; $h = 3/4 \cdot h_0$ – біжуча висота зазору; H – віддаль між поверхнями валків при вході в зазор; L_p – робоча довжина валка.

У зв'язку з тим, що каландрування здійснюють з високою частотою обертання валків, тиск, який виникає в розтопі, викликає згин валків, у центральній частині (рис. 4.108, а). Таке явище призводить до різнотовщинності плівки.

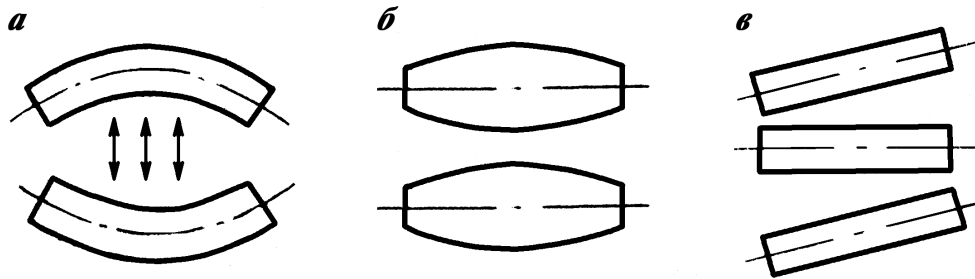


Рис. 4.108 Форма і схема розміщення валків

Для усунення різнотовщинності застосовують різні способи, серед яких такі, як: валки виконують у формі діжки (рис. 4.108, б), або розміщують їх за схемою невеликого перехрещення осей (рис. 4.108, в). У першому випадку необхідна заміна валків, коли в діючому каландрі валки рівнотовщинні. Другий спосіб не потребує додаткових витрат на виготовлення валків. Для боротьби з різнотовщинністю плівки застосовують також контрвигин валків.

Режим охолодження вибирають аналогічно до охолодження плоских екструзійних плівок. Однак, внаслідок високої концентрації орієнтаційних напружень у плівці висуваються підвищені вимоги до рівномірності температурного градієнту по всій ширині плівки (довжині валка). Кількість охолоджувальних валків визначають із швидкості охолодження і дуги охоплення:

$$S = \frac{2 \cdot \tau_{\text{охол}} \cdot v_{\text{охол}}}{m}, \quad (4.141)$$

де: m – кількість валків; S – дуга охоплення; $\tau_{\text{охол}}$ – час на охолодження до температури штивності, $v_{\text{охол}}$ – швидкість охолодження.

4.5.2.2 Матеріали, які переробляють методом вальцювання і каландрування

Валковим методом переробляють наступні матеріали: ПВХ – пластикат і вініпласт, естери целюлози, ударотривкий полістирол (УПС), поліетилен (ПЕ), поліпропілен (ПП). Отже, у переробці методами вальцювання і каландрування використовують ті полімери, котрі характеризуються високою в'язкістю розтопу.

При виготовленні композицій на основі полівінілхлориду використовують полівінілхлорид латексний чи суспензійний, стабілізатори для захисту полімеру від термічного розкладу під час переробки і від деструкції під час експлуатації, пластифікатори для поліпшення технологічних властивостей, пом'якшувачі для часткової заміни деяких пластифікаторів, а також наповнювачі для здешевлення матеріалу і надання йому специфічних властивостей, барвники і змашувальні речовини.

Для виготовлення вінілпластової каландрової плівки використовують композицію такої рецептури (в мас.ч.):

ПВХ	– 100
Меламін	– 2
Трансформаторна олива	– 2
Стеарин	– 1

Випускають плівку товщиною від 0,4 до 0,9 мм, шириною від 400 до 500 мм, довжиною від 1 до 20 м, яка має колір від світло-до червонувато-коричневого.

Композиція для шттивного безосновного лінолеуму має такий склад (в %):

ПВХ-С63М	– 27
Дибутілфталат	– 14
Веретенна олива	– 1,5
Стеарат кальцію	– 0,5
Тальк	– 27
Барит	– 27
Пігменти	– 3

Частіше використовують композиції для виготовлення лінолеуму, який має основу (наприклад, тканинну). Ці композиції вміщують 30 ÷ 50 % ПВХ, 20 ÷ 40 % пластифікатора і 20 ÷ 50 % наповнювача з невеликими додатками пігментів і стабілізаторів.

Із пластикату виготовляють плівки різноманітного призначення. Орієнтовні рецептури для виготовлення полівінілхлоридних пластикатних плівок різного призначення наведені в таблиці 4.24.

Таблиця 4.24

Рецептури композицій, що їх використовують для виготовлення полівінілхлоридних плівок

Компоненти рецептури	Вміст компонентів, мас.ч., в плівках на основі ПВХ		
	для парників	для пакування	морозостійких
ПВХ	100	100	100
Диоктифталат	40	50	30
Диоктилсебацінат	–	–	30
Свинцеві білила	–	0,2	–
Силікат свинцю	–	–	10
Стеарат кальцію	1	3	3
Стеарат барію	1	–	–
Стеарин	–	1	–
Полігард	1	–	–

4.5.2.3 Одержання плівки з неластифікованого ПВХ вальцювальньо-каландровим методом

ПВХ та інші компоненти композиції (стабілізатор, барвник, наповнювачі, змашувальні речовини) перемішують у змішувачі. Одержану суміш подають на вальцювання, яке здійснюють на двох типах вальців: завальцювальних і довальцювальних. Вальцювання на перших вальцях із фрикцією 1,2 ÷ 1,4 проводять протягом 15 ÷ 20 хвилин при температурі валків 160 ÷ 170 °С і мінімальному зазорі між ними. Масу підрізають декілька разів і у вигляді полотна знову повертають у робочу зону вальців. Потім її у вигляді рулону передають на довальцювальні вальці, що мають ту саму температуру, але дещо більший зазор між валками, ніж перша група вальців. Після другого вальцювання протягом 6 ÷ 7 хвилин матеріал згортають у рулон і подають на тривалковий каландр. Для забезпечення високої продуктивності технологічна лінія включає три завальцювальні, одні довальцювальні вальці і каландр.

Тривалковий каландр має температуру валків 160, 170 і 180 °С. Залежно від товщини плівки композицію на основі ПВХ переробляють зі швидкістю 4 ÷ 12 м/хв, що відповідає продуктивності 160 ÷ 250 кг/год.

Готова плівка потрапляє на рольганг, валки якого охолоджуються водою, а потім - на приймальний стіл, де відбувається розрізання полотна пристроєм гільйотинного типу та складання одержаних шматків у пакети.

Шорстку плівку з ПВХ використовують для виготовлення сепараторів для акумуляторних баків, а також для одержання листового вініласту необхідної товщини шляхом пресування.

4.5.2.4 Виготовлення плівки з ПВХ екструзійно-каландровим методом

За цією технологією попереднє змішування композиції ПВХ здійснюється в двокамерному змішувачі (рис. 4.109). Потім порошкоподібну композицію вивантажують із змішувача на вальці, за допомогою яких відбувається гомогенізація та накопичування матеріалу. Потім матеріал неперервно подається на екструдер-пластикатор, де проходить розігрівання та пластикація його. Далі він у вигляді стрічки виходить через плоскощілинну екструзійну головку і транспортером подається в завантажувальну камеру чотиривалкового каландра. Іноді замість вальців і екструдера використовують двошнековий змішувач-пластикатор, який безпосередньо подає підготовлений матеріал до каландра.

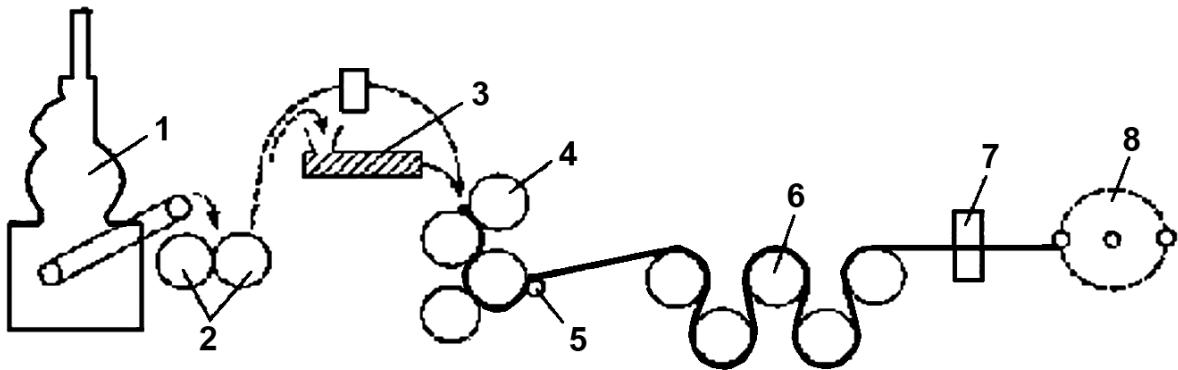


Рис. 4.109 Технологічна схема одержання плівки з термопластичного матеріалу методом каландрування. 1 – змішувач; 2 – валки; 3 – шприц-машина; 4 – похилий Z – подібний каландр; 5 – відбірний ролик; 6 – охолоджуючі валки; 7 – товщиномір; 8 – приймальний пристрій

Каландрування плівки з пластифікованого ПВХ проводять із значно вищою швидкістю, ніж при переробці неластифікованого ПВХ (вона досягає $60 \div 100$ м/хв.). Температура валків каландра – $140 \div 150$ °С (вона поступово підвищується від 140°С на першому валку до 150 °С на четвертому) (рис.4.109).

Готова плівка відводиться на приймальний валок, а потім через систему натяжних валків подається в охолоджувальний пристрій. Він включає чотири вали великого діаметру, температура яких послідовно знижується. Охолоджена плівка проходить через пристрій для замірювання і контролю товщини і, після відрізання країв, потрапляє до вузла намотування.

З пластифікованого ПВХ екструзійно-каландровим способом одержують плівки товщиною від 0,05 до 1 мм.

4.5.2.5. Виготовлення плівки з пластифікованого ПВХ вальцювально-каландровим методом

Для виготовлення плівок бажано використовувати суспензійний ПВХ з високою адсорбційною здатністю щодо пластифікаторів. Спочатку проводять змішування інгредієнтів у двостадійних відцентрових лопаткових змішувачах. Спочатку проводять гаряче змішування компонентів при температурі $90 \div 100$ °С протягом $20 \div 40$ хвилин. Потім

композиція потрапляє до другої секції змішувача, де вона охолоджується при інтенсивному перемішуванні.

Далі суміш завантажують у шнековий осцилюючий змішувач, де за рахунок нагрівання та інтенсивної деформації зсуву порошкоподібна композиція переходить у в'язкотекучий стан. Температура пластикації становить $140 \div 160$ °С. Потім за допомогою стрічкового конвеєра маса подається на вальці неперервної дії. На вальцях відбувається додаткова пластикація матеріалу та видалення летких речовин. Коефіцієнт фрикції при вальцюванні маси становить $1,2 \div 1,4$, а зазор між валками встановлюється в межах $0,5 \div 1,0$ мм. Температурний режим вальцювання композицій на основі пластикуваного ПВХ подано в таблиці 4.25.

Таблиця 4.25

Температурний режим вальцювання плівок з пластифікованого ПВХ

Плівка	Температура валків, °С	
	переднього	заднього
для парників	170	165
для пакування	180	175
для пакування (морозостійка)	185	180

Тривалість вальцювання $5 \div 10$ хвилин. Завершення вальцювання визначають за зовнішнім виглядом полотна, в якому не повинно бути включень непровальцьованої маси.

Вальцювання проводять на двох, трьох чи чотирьох вальцях (залежно від потреби вальцювальної маси), щоб забезпечити неперервну роботу каландра.

Каландрування здійснюють найчастіше на чотиривалковому Г-подібному каландрі. Рулони провальцьованої стрічки транспортером подають до каландра. Коефіцієнт фрикції при каландруванні становить $1,1 \div 1,3$ (іноді фрикція відсутня). Швидкість каландрування становить $15 \div 100$ м/хв. і залежить від рецептури композиції, товщина плівки й інших факторів. Температурний режим каландрування плівок з пластифікованого ПВХ подано в таблиці 4.26.

Таблиця 4.26

Температурний режим каландрування плівок з пластифікованого ПВХ

Термопласт	Температура валків, °С			
	1	2	3	4
для парників	170	170	165	165
для пакування	185	180	175	170
для пакування (морозостійка)	180	175	170	165

Плівка з робочих валків каландра через охолоджувальні і спрямовуючі валки подається на групу охолоджувальних валків і потім за допомогою тягових валків відводиться на намотувальний пристрій. Лінія має ножі для поперечного і поздовжнього нарізання. Продуктивність каландрової лінії для одержання плівки з пластифікованого полівінілхлориду товщиною 0,4 мм і шириною 1250 мм становить 500 кг за годину.

4.5.2.6 Види браку при вальцюванні, причини його виникнення і усунення

Технологічні неполадки і брак розрізняють за стадіями процесу:

1. – в період пуску агрегату і виходу на режим;
2. – в період відлагодження процесу.

У період пуску брак виникає через несправне обладнання та неправильно встановлений технологічний режим. Цей брак не вважається технологічним.

У таблиці 4.27 наведено основні види браку при вальцюванні (каландруванні), причини його виникнення і способи усунення.

Таблиця 4.27

**Види браку при вальцюванні (каландруванні),
причини його виникнення і шляхи усунення**

Види браку	Причини браку	Способи усунення
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Деструкція полімеру на вальцях, в каландрі	Висока температура маси; висока фрикція	Знизити температуру маси, зупинити обладнання і почистити його; змінити фрикцію
Недостатня гомогенізація матеріалу після вальців	Занижена температура валків; висока швидкість вальцювання	Відрегулювати режим вальцювання
Матовість поверхні.	Низька температура валків; порушено склад композиції	Відрегулювати температурний режим каландрування; перевірити правильність завантаження компонентів
Шорсткість плівки	Погано відшліфовані валки каландра; низька температура валків; висока швидкість каландрування	Відшліфувати валки каландра; підвищити температуру валків; знизити швидкість каландрування
Крихкість плівки; включення непровальцьованого матеріалу	Погано відвальцьована композиція	Поліпшити вальцювання композиції
Наявність у плівці сторонніх включень	Забруднена сировина; забруднене обладнання	Перевірити чистоту сировини; почистити обладнання
Розривання полотна плівки	Порушено співвідношення швидкостей тягового пристрою і четвертого валка каландра	Відрегулювати частоти обертання валків
Плями на поверхні листа чи плівки	Забруднена композиція; недостатнє охолодження на охолоджувальному валку	Замінити композицію; збільшити охолодження
Утворення повітряних пухирів	Недостатній тиск у зазорі	Зменшити зазор між валками
Утворення гофри на поверхні листа чи плівки	Висока швидкість каландрування; низька температура каландрування	Знизити швидкість каландрування; підвищити температуру валків каландра
Злипання плівки при намотуванні	Недостатнє охолодження плівки	Понизити температуру охолоджувального валка
Різнововщинність плівки по ширині	Неправильно встановлено зазор між валками; неправильно встановлено кут перекоосу валків	Правильно встановити зазор між валками; змінити кут перекоосу валків

5. ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ З РЕАКТОПЛАСТІВ

Основними методами переробки реактопластів (РП) є компресійне і литтєве пресування, лиття під тиском. Для армованих пластиків використовують контактне формування, напилення, метод намотки. Існує також відливання у форму; можлива переробка ротаційним формуванням та екструзією.

Фізико-хімічні процеси, які відбуваються при переробці реактопластів, полягають у переведенні зв'язного у в'язкотекучий (чи розчинний) стан з наступною незворотною деформацією, течією з високим напруженням зсуву, ущільненням розтопу та затвердженням (структуруванням) при температурі. Отже, процес базується на пластичній деформації розтопу під дією теплоти і тиску з наступною хімічною фіксацією форми.

5.1. Технологія виготовлення виробів пресуванням

Існує два способи пресування:

1. компресійне (пряме) пресування (рис. 5.1);
2. інжекційне (литтєве) пресування (рис. 5.2).

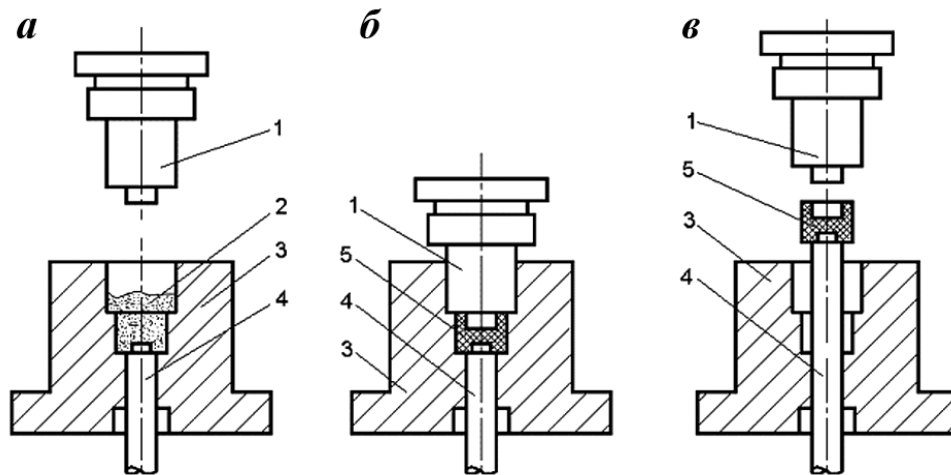


Рис. 5.1. Схема компресійного (прямого) пресування:

а) завантаження прес-матеріалу; б) змикання форми (пресування); в) розмикання форми і виштовхування виробу; 1 – пуансон; 2 – прес-матеріал; 3 – матриця; 4 – виштовхувач; 5 – виріб

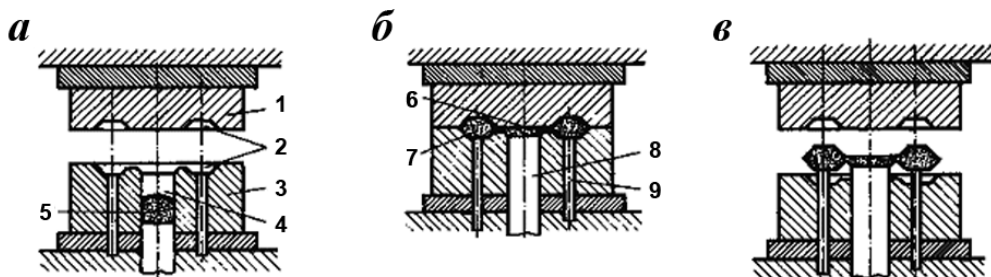


Рис. 5.2. Схема литтєвого пресування:

а) завантаження прес-матеріалу у циліндр топлення; б) змикання форми і пресування; в) розмикання форми і виштовхування виробу; 1 – пуансон; 2 – формувальне гніздо; 3 – матриця; 4 – циліндр топлення (завантажувальна камера); 5 – прес-матеріал; 6 – розвідний канал; 7 – виріб; 8 – плунжер (шток); 9 – виштовхувач

Пряме (1) пресування полягає у формуванні виробу при нагріванні шляхом значної пластичної деформації (стискання) розтопу у прес-формі під тиском.

Литтєве пресування (2) полягає у заповненні прес-форми розтопом полімеру шляхом в'язкої течії через ливниковий канал форми під дією тиску, що створюється в циліндрі топлення (5).

Пресування здійснюється на звичайних гідропресах однопозиційних, прес-автоматах, багатопверхових пресах і роторних лініях.

5.1.1. Компресійне пресування

Як зазначалось, процес полягає в безпосередньому наданні необхідної форми виробу під дією високого тиску, що створюється в прес-формі при температурі швидкого затвердження матеріалу. При цьому формування проходить такі стадії:

1. Ущільнення матеріалу. Внаслідок зовнішнього тиску в сировині, яка використовується у вигляді дрібнодисперсного порошку або спресованих з нього таблеток, відбувається зближення меж розподілу між частинками. По місцях контакту частинок відбувається деформація (крихка і високоеластична). Ущільнення таблеток супроводжується їх руйнуванням з наступним ущільненням в уламках.

Під час зближення і деформування частинок спостерігається додатковий розігрів матеріалу, який разом із зовнішнім нагрівом призводить до топлення зв'язного.

2. В'язка течія розтопу. Компресійне пресування полягає у розтіканні утвореного розтопу всією порожниною форми з додатковим ущільненням розтопу під тиском і утворення монолітного об'єму. В процесі течії можлива орієнтація наповнювача в напрямку дії тиску.

3. Затвердження. Процес полягає у перебігу реакції зшивання макромолекул внаслідок поліконденсації між вільними функційними групами зв'язного або затверджувача і зв'язного. Реакція відбувається в розтопі під дією теплоти, з виділенням низькомолекулярних, летких речовин (вода, формальдегід, метанол, аміак та ін.)

5.1.1.1. Вихідні матеріали (сировина) для пресування

Для пресування використовується сировина у вигляді порошоків або волокнітів і за типом зв'язного поділяються на:

1. феноласти – новоланні, резольні, модифіковані смоли;
2. аміноласти – карбамідоформальдегідні, меламіноформальдегідні і модифіковані;
3. кремнійорганічні прес-порошки;
4. поліестерні прес-матеріали на основі ненасичених поліестерних смол;
5. епоксидні прес-матеріали;
6. гетероциклічні (термопластичні) прес-матеріали – полііміди, поліоксадіазоли, поліарилати, полісульфони, що наповнені мінеральними чи металевими (в т.ч. оксидами металів) порошками.

Прес-матеріал, як правило, містить 30 ÷ 60 % зв'язного і відповідно 70 ÷ 40 % наповнювача. Крім того він може містити затверджувачі, барвники, мастильні речовини, тощо. В ролі наповнювачів вживають деревину, азбестову та кварцову муку, каолін, азбест волокнистий, скловолокно, целюлозне волокно тощо.

Класифікація прес-матеріалів

Прес-порошки на основі фенопластів розділені на окремі групи за призначенням, яке символізується окремою буквою на початку маркування:

- загально технічного призначення – буква “О” (наприклад, О3, О10);
- спеціального – “Сп 1” (Сп1, 2, 3);
- вологохімстійкі – “Вх 1” (1 ÷ 6);
- ударотривкі – “У 1” (1, 2, ...);

– жаровитривалі – “Ж 1” (1 ÷ 4).

Волокніти – прес-матеріали на основі резольного зв'язного і волокнистого (скло, базальт, азбест) наповнювача. Використовуються для одержання виробів з підвищеною механічною міцністю, стійкістю до динамічних навантажень, до ударів.

Марки волокнітів: АГ - 4В – для виробів з ізотропними властивостями (однаковими в усіх напрямках), АГ - 4С – для виробів з анізотропними властивостями, ДСВ – дозований скловолокніт, ГСП – гранульований склопластик, СГ – швидкотверднучий скловолокніт.

Амінопласти. Прес-порошки на основі аміноальдегідного зв'язного і целюлозного наповнювача з широкою гамою кольорів і відтінків. Вироби на їх основі відзначаються хорошими поверхневою твердістю і блиском, і можуть контактувати з харчовими продуктами. Основним недоліком цих матеріалів є високе водопоглинання (до 10 % мас.). Маркуються амінопласти: А – технічні, А1 – для прозорих виробів і А2 – для непрозорих виробів; Б – побутові; В – електротехнічні; Г – дугостійкі; Д – теплостійкі.

Інколи на початку ставлять початкові букви зв'язного: МФ (меламіноформальдегідні), КФ (карбамідоформальдегідні), тощо.

Кремнійорганічні – КФ (1÷10) застосовуються для виробів з підвищеною термотривкістю (експлуатуються в межах від -60 °С до +400 °С), поділяються на азбонаповнені, склонаповнені і без наповнювача.

Поліестерні прес-порошки відзначаються дешевизною і високою міцністю виробів.

Епоксидні – мають високу силу зчеплення зв'язного з наповнювачем і характеризуються низьким ступенем усадки (збіжності), що дозволяє одержувати вироби з високою точністю розмірів. Маркування – за типом зв'язного, або за призначенням, наприклад, УП-643.

Технологічні властивості прес-матеріалів і їх вплив на технологію переробки

До технологічних характеристик належать:

Об'ємні: гранулометричний склад, насипна питома маса, і насипний питомий об'єм, питомий об'єм і питома густина ущільнення, коефіцієнт ущільнення, усадка (збіжність), таблетованість, сипкість, та особливі **технологічні властивості** – реологічні, температура переходу у в'язкотекучий стан, час перебування у в'язкотекучому стані, час затвердження.

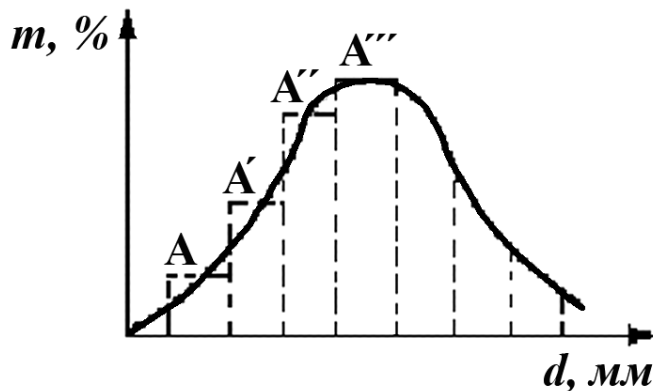
Всі характеристики мають важливе значення при розробці технологічного процесу, виборі і конструюванні обладнання і оснащення.

Гранулометричний склад. Прес-порошки випускаються промисловістю з розміром частинок (зерен) 0,2 ÷ 0,5 мм. Однак виробництво не дозволяє отримати монодисперсний порошок. Крім того, при транспортуванні і зберіганні можливе укрупнення зерен, що збільшує полідисперсність порошку. Полідисперсність (гранулометричний склад) визначають шляхом просіювання порошку на наборі сит з різним розміром комірок, при цьому визначають процентний вміст фракції встановленого розміру частинок. Гранулометричний склад оцінюють за кривими розподілу фракцій-гістограмами (рис. 5.3). Чим вужча крива розподілу, тим менша полідисперсність.

Гранулометричний склад (г.с.) у технології переробки має найбільший вплив на процес, який відбувається в автоматичному режимі: прес-автоматах, автоматичних таблет-машинах. Полідисперсність викликає нерівномірність дозування, зміну часу дозування (через непостійність густини і сипкості), підвищення енерговитрат. У зв'язку з цим може виникати брак виробу – нестабільність розмірів, розбіжність міцності і монолітності.

Слід пам'ятати, що прес-порошки з розмитою гістограмою (велика полідисперсність) при зберіганні і транспортуванні можуть розділятися (сепаруватися) за фракціями, що значно ускладнює технологічний процес і негативно впливає на якість виробу. Наявність крупних частинок призводить до підвищення пористості виробу, появи здуття та раковин.

Дрібнодисперсний порошок сприяє швидкому топленню зв'язного, що інтенсифікує процес формування. Однак у цьому випадку можна одержати виріб з шорсткою поверхнею, оскільки швидке топлення призводить до відділення зв'язного від наповнювача.



$A \div A'''$ – фракції з усередненням d_i .

Рис. 5.3. Гістограма прес-порошку

Корекція гранулометричного складу здійснюється усередненням партій і просіюванням.

Насипна густина – маса вільно насипаного в одиниці об'єму прес-порошку (ρ_n). Питомий насипний об'єм V_n – зворотна величина до ρ_n .

Насипна густина – функція гранулометричного складу і тому відіграє важливу роль в організації технології. На ρ_n впливає природа зв'язного і наповнювача, які визначають істинну густину матеріалу і його здатність до помолу. ρ_n і V_n залежать від розміру і форми частинок прес-порошку. За всіх інших рівних умов найбільшою ρ_n характеризуються порошки з частинками сферичної форми, яка обумовлює найбільш щільне укладання (до 75% твердої фази в об'ємі).

Технологічні прес-матеріали мають щільність укладання 25 ÷ 70 %. Насипна густина значно залежить від шорсткості частинок і здатності матеріалу до електризації. Чим вища шорсткість, тим вищі сили зчеплення, що викликають ефект зависання, а тому призводять до зменшення ρ_n . Електризація також зменшує ρ_n . Волога дещо сприяє ущільненню матеріалу.

Насипну густину і питомий об'єм використовують для розрахунку об'ємів завантажувальних пристроїв – бункерів, завантажувальних камер оснащення, ємностей для зберігання і транспортування. Так, наприклад, для переробки матеріалу з великим V_n потрібно використовувати прес-форму з великою завантажувальною камерою, що викликає перевитрату металу, обтяжування форми, збільшення робочого ходу обладнання. Особливо важливим є значення V_n при переробці матеріалу на екструдерах, чи литтєвих машинах, оскільки з зростанням V_n зменшується їх продуктивність і тиск в циліндрі; зростає час циклу переробки внаслідок зменшення теплопровідності.

Слід пам'ятати, що полідисперсні матеріали розшаровуються, що викликає зміну ρ_n і V_n в об'ємі, тому ускладнюється дозування. В зв'язку з переліченими факторами впливу на технологічний процес матеріали найчастіше гранулюють або таблетують.

Насипна густина і питомий об'єм утруски – це значення ρ_y і V_y , визначені після вібрації вимірюваного об'єму з частотою 4 ÷ 5 Гц (15 хв).

Коефіцієнт ущільнення – це відношення густини відпресованого зразка без нагріву до насипної густини порошку чи гранул (вихідної сировини):

$$K_y = \rho_\phi / \rho_n = V_n \cdot \rho_\phi, \quad (5.1)$$

Коефіцієнт ущільнення використовується для розрахунку завантажувальних камер прес-форми.

Усадка (збіжність) виробів з пластмас. Під час охолодження виробу після формування спостерігається усадка, тобто зменшення лінійних розмірів виробу (виріб збігається), що потрібно враховувати при розрахунку виконавчих розмірів прес-форм.

U_L – лінійна усадка (залежить від коефіцієнту термічного розширення):

$$U_L = \frac{l_1 - l_0}{l_1} \cdot 100\%, \quad (5.2)$$

де: l_1, l_0 – лінійні розміри відповідно формувальних поверхонь прес-форми і охолодженого виробу.

Для пластмас може спостерігатися різне значення усадки в напрямку дії тиску пресування ($U_{||}$) і перпендикулярно до його дії (U_{\perp}). Відношення $U_{||}/U_{\perp}$ називається анізотропією усадки, яка значно залежить від природи наповнювача і товщини стінок виробу. Найбільша анізотропія усадки для деревної муки, яка використовується як наповнювач, найменша - для мінерального наповнювача (каолін). Для тонкостінних виробів усадка більша по висоті стінки виробу, ніж по товщині. Анізотропію можна пояснити орієнтацією наповнювача в напрямку дії напруження зсуву при течії в момент заповнення форми. Для волокнітів усадка і анізотропія усадки менші, ніж для порошкоподібних пластмас.

При проведенні термообробки (термовідпалу) у випадку високої орієнтації спостерігається додаткова усадка:

$$U_T = \frac{l_0 - l_T}{l_0} \cdot 100\%, \quad (5.3)$$

де: l_T – розмір виробу після обробки.

Фактори, які впливають на усадку.

1. Природа зв'язного і наповнювача – кожен з них має свою усадку від температурного розширення.
2. Час витримки під тиском (час затвердження); до повного затвердження усадка зменшується зі зростанням часу, потім є сталою: це пояснюється можливістю релаксаційних процесів в просторовій сітці при неповному затвердженні.
3. Температура пресування – при значному підвищенні температури усадка зростає, оскільки спостерігається більше лінійне розширення, а також нерівномірне затвердження через утворення поверхневої кірки, яка запобігає внутрішньому затвердженню.
4. Вміст вологи призводить до збільшення усадки.
5. Попередній підігрів (час і температура) зменшує усадку.

Сипкість матеріалу. Це здатність матеріалу рівномірно витікати через стандартний отвір. Ця характеристика виражається часом, необхідним для спорожнення стандартної лійки.

На сипкість впливає гранулометричний склад, форма частинок порошку, вологість. Найкращу сипкість мають гранули і порошки із сферичною поверхнею частин. Тонкодисперсні матеріали малосипкі, що пов'язано з сильно розвинутою поверхнею частин і їх високою сорбційною здатністю. Такі порошки легко адсорбують вологу, що призводить до злипання, комкування.

Нерівномірна сипкість обумовлює неточність дозування, що порушує точність дозування і викликає зміну технологічного режиму, пониження продуктивності обладнання (особливо екструзійного), появу браку (недопресовки, недоливки, при таблетуванні – розбіг за масою таблеток). При таблетуванні маса таблетки може змінюватись до 6 %, що потребує свідомого підвищення маси на 2 ÷ 3 % для зменшення браку при пресуванні.

Особливі технологічні характеристики прес-матеріалу. До них належать: реологічні властивості розтопу, температура в'язкотекучого стану, час перебування у в'язкотекучому

стані, час затвердження. Вони відіграють основну роль в розробці технологічного режиму пресування.

Технологічні характеристики визначаються на пластометрі Канавця (шляхом зняття кривих затвердження РП), методом Рашига, а час затвердження – пресуванням стандартного стаканчика.

У пластометрі використовується принцип фіксації зміни напруження зсуву у розтопі в часі при відповідній температурі, при якій існує розтоп (в'язкотекучий стан) і реакція зшивання. Внаслідок зшивання в'язкість зростає і зростає напруження зсуву, яке передається від обертової обойми через розтоп до датчика (рис. 5.4).

З рисунку видно, що при збільшенні температури зростає швидкість затвердження (нахил α) і час в'язкотекучого стану та час затвердження зменшуються.

Ступінь затвердження (c) пов'язаний з константою швидкості поліконденсації:

$$\frac{dc}{dt} = K_{(T)} \cdot (1-c)^m, \quad (5.4)$$

де: $K_{(T)}$ – константа швидкості реакції, залежить від T ; m – порядок реакції, $m \approx 1,42$.

Звідси видно, що чим вища температура, тим вища швидкість затвердження.

Повний час затвердження є функцією температури і природи зв'язного:

$$\tau_{зтв} = B^{-\beta T}, \quad (5.5)$$

де: B, β – константи; β залежить від реакційної здатності зв'язного.

Швидкість (час) затвердження залежить від тиску екстремально – до 80 МПа зменшується, а при подальшому підвищенні тиску швидкість зростає.

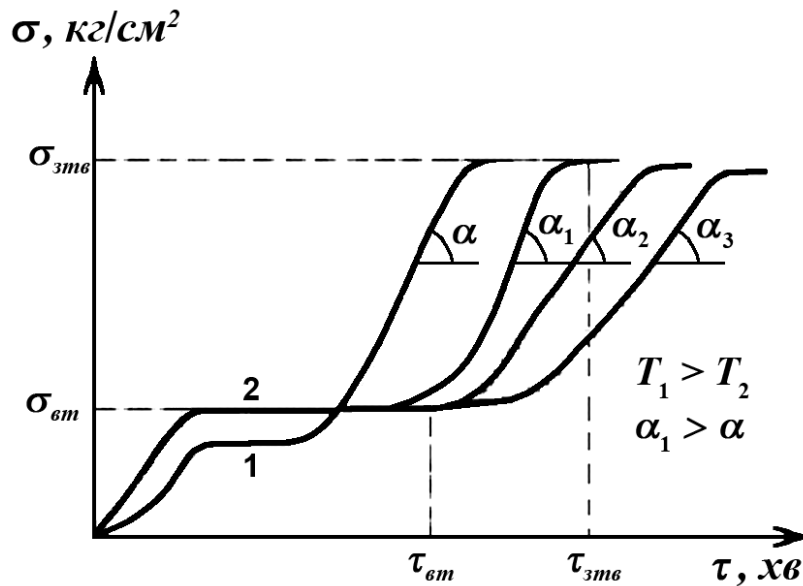


Рис. 5.4. Криві затвердження:

$\tau_{вт}$ – час перебування у в'язкотекучому стані при T_2 ; $\tau_{зтв}$ – час затвердження при T_2 ;
 $\sigma_{вт}$ – напруження зсуву в'язкої течії; $\sigma_{зтв}$ – напруження зсуву затвердженого матеріалу.

Чим більше вологи, тим повільніше відбувається реакція ($\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3$).

5.1.1.2. Типовий технологічний процес пресування

Типовий технологічний процес пов'язаний з конкретним методом переробки і придатний для виготовлення будь-яких виробів з однотипної сировини (прес-матеріалів). Процес полягає у послідовному здійсненні ряду стадій, які необхідні для реалізації раціонального виробництва виробів з можливо максимальною продуктивністю.

Типовий процес об'єднує перелік, конкретний опис всіх стадій, які властиві даному методу переробки.

Основні стадії процесу:

1. Прийом сировини;
2. Транспортування сировини;
3. Зберігання сировини;
4. Контроль якості сировини;
5. *Підготовка сировини;
6. *Таблетування;
7. Дозування сировини;
8. Попереднє підігрівання сировини;
9. Формування виробу;
10. Механічна обробка;
11. *Термообробка виробу;
12. Контроль якості виробу;
13. Пакування виробів;
14. Транспортування і зберігання виробів;
15. Переробка (утилізація) відходів виробництва.

Стадії 1 ÷ 8 – підготовчі, 9 – основна, 10 ÷ 14 – завершальні.

Стадії, які відмічені зірочкою, залежно від умов виробництва можуть не проводитись або проводитись, а також такі які можуть здійснюватись за межами цеху пресування (зокрема, стадія таблетування).

Як ми вже згадували, стадії, які передують формуванню, називаються підготовчими, а стадії, що слідують після формування виробу, називаються завершальними (викінчувальними) і націлені на доведення виробу до вигляду у відповідності з технічними вимогами.

Коротко розглянемо окремо кожну стадію. Стадію формування, як визначальну, винесемо окремо.

а) Підготовчі стадії пресування

Зберігання і транспортування. Прес-матеріали постачаються на завод у вигляді порошку чи волокніту, розтарованого в мішки масою 25 ÷ 30 кг, або в тюках. Гранульовані матеріали можуть розтаровуватись в контейнерах і цистернах.

При транспортуванні і зберіганні прес-матеріалу повинні дотримуватись умови, які б виключали попадання вологи, дію прямого сонячного опромінення, різкі перепади температур (особливо їх підвищення). Матеріал транспортують партіями, які випускаються промисловістю одноразово і мають однакові технологічні характеристики у відповідності зі стандартом чи сертифікатом. Розмір партії від 300 до декількох тисяч кілограмів.

Зберігання сировини. Сировину зберігають у спеціально відведеному і обладнаному місці (склад сировини) партіями при температурі 15 ÷ 25 °С і відносній вологості 60 ÷ 70 %.

Існують гарантійні строки зберігання прес-матеріалу:

- фенопласти – 3 ÷ 8 місяців;
- амінопласти – 3,5 ÷ 5 місяців.

Транспортування технологічною лінією цеху здійснюють залежно від зовнішнього вигляду сировини пневмотранспортом, стрічковим конвеєром чи на електрокарах. Кількість матеріалу, що подається в цех, залежить від програми і змінної продуктивності обладнання.

Контроль якості сировини. Це важлива стадія, від якої значно залежить перебіг технологічного процесу формування виробів. Існує три види контролю: вхідний, поточний контроль та арбітражний.

Вхідний здійснюється для перевірки відповідності матеріалу стандарту чи технічному паспортові (сертифікату).

Поточний використовується для:

- встановлення і корекції технологічних параметрів переробки;
- підбору необхідної партії для формування конкретного виробу;
- перевірки терміну зберігання сировини;
- при проведенні усереднення партій для встановлення технічних характеристик одержаної змішаної партії.

Відбір проб для проведення контролю. Проби відбираються з кожної партії окремо, при цьому охоплюються не менше, як 10 % тари в кожному випадку. Кожна проба береться не менше, як з трьох місць в об'ємі тари у відповідній кількості, необхідній для проведення всіх чи вибіркового аналізів. Спочатку проби квартують: висипають на площину, розрівнюють тонким шаром, ділять на квадрати і для визначення беруть не менше трьох квадратів. Визначають властивості (технологічні характеристики) і перевіряють їх відповідність даним паспорту і державному стандарту.

На їх основі проводиться корекція технологічного режиму, або визначається придатність сировини до переробки чи додаткової обробки (підготовки).

При невідповідності сировини, яка поступила на виробництво, хоча б за одним показником забороняється використання її у виробництві, і вона передається на арбітражний контроль. Арбітражний контроль здійснюють у спеціалізованих лабораторіях у присутності виробника продукції і її споживача. Арбітражний контроль встановлює, чи придатна сировина до виробництва, чи належить для повернення виробнику.

Таблетування прес-матеріалу. Значно спрощує технологічний процес переробки РП, підвищує культуру виробництва, зменшує забрудненість лінії і, що дуже важливо, спрощує дозування матеріалу.

Для дозування прес-матеріалу використовують три методи, які залежать від виду сировини, конструкції форми і специфіки виробництва: масовий, об'ємний, поштучний.

Масовий найбільш трудомісткий. Однак при використанні сучасних методів зважування – найбільш точний. Використовується при дозуванні прес-порошків у випадку виготовлення малогабаритних, відповідальних виробів.

Об'ємне дозування полягає у відборі доз об'ємними (мірними) засобами. Це найбільш неточний метод, точність якого значно залежить від об'ємних характеристик матеріалу, але може здійснюватись на об'ємних автоматах-дозаторах.

Поштучне дозування застосовується тоді, коли у виробництві використовуються таблетки. Таблетки мають встановлену масу і тому не потребують зважування.

Поштучне дозування (використання таблеток) має такі переваги:

- а) скорочення часу дозування і підвищення продуктивності процесу; можливість використання автоматів-дозаторів;
- б) зменшення втрат при дозуванні;
- в) зменшення об'єму завантажувальної камери технологічного оснащення, отже, зменшення габаритів форми і ходу пуансона, що здешевлює процес і інтенсифікує його;
- г) зменшення вільного об'єму повітря (т.з. повітряних порожнин) у виробі, що підвищує його якість і фізико-механічні властивості;
- д) використання таблеток значно полегшує й інтенсифікує попередній підігрів сировини – процес прискорюється в зв'язку з підвищенням теплопровідності матеріалу у компактному, спресованому вигляді;
- е) покращується формування виробів складної конфігурації у зв'язку з можливістю використання таблеток, конфігурація яких відповідає конфігурації окремих ділянок виробу;

ж) покращуються санітарно–гігієнічні умови проведення процесу пресування.

Недолік поштучного дозування: можливий брак виробу за розміром, чи “недопресовки” у зв’язку з відхиленням маси таблетки (див. технологічні характеристики).

Для оцінки здатності прес-порошків, які містять порошкоподібний наповнювач, до таблетування використовують таку характеристику як таблетованість. Таблетованість – здатність прес-матеріалу спресовуватись в компакту міцну таблетку під дією зовнішнього тиску без нагріву і зберігати задану форму після зняття тиску. Таблетування проводять при температурі, що близька до кімнатної, і тиску $70 \div 120$ МПа. Слід зауважити, що з підвищенням тиску значно зростає зношування машин і збільшуються енерговитрати.

Таблетованість характеризується міцністю таблетки, яка залежить від природи зв’язного і наповнювача, гранулометричного складу прес-порошку, вмісту вологи, мастильних речовин і визначається тиском пресування і швидкістю прикладання зовнішнього зусилля, умов і часу пресування. Зусилля пресування визначається необхідною міцністю таблетки, яка повинна бути близькою до 8 МПа. Для визначення міцності використовують такий метод: виготовляють таблетку (циліндр) $d = 20$ мм і $H = 16$ мм. В таблетку втискають сталю кульку $d = 5$ мм і визначають зусилля, при якому відбувається руйнування таблетки. Це і буде кількісною характеристикою таблетованості (T_a) за міцністю.

На T_a впливають такі фактори:

- вміст вологи і мастильних речовин (покращують T_a , підвищують міцність таблетки), тому інколи прес-матеріал зволожують;
- гранулометричний склад – зі збільшенням розміру частинок здатність до таблетування погіршується, зменшуються фізико-механічні властивості таблеток. Чим менша частинка порошку, тим більша міцність, оскільки така частинка має більш розвинуту поверхню, при цьому зростає поверхня контакту між частинками;
- природа наповнювача – найкраще спресовуються прес-порошки з мінеральним наповнювачем у вигляді порошку. Таблетування з волокнистим наповнювачем ускладнюється в зв’язку з нерівномірністю передачі зусилля і виникненням анізотропії за висотою й об’ємом виробу. Найчастіше волокніти джгутують. Джгутування здійснюється на агрегатах екструзійного типу, чи гвинтових валках (без нагріву).

Технологічні параметри таблетування:

- а) температура – з підвищенням температури зростає міцність таблетки (але можливе затвердження зв’язного);
- б) тиск – закономірно підвищує міцність (рис. 5.4);
- в) швидкість дії зусилля – чим вища швидкість спресування, тим гірша якість таблетки, оскільки матеріал не встигає ущільнитись по всьому об’єму через невідповідність швидкості передачі тиску по висоті і швидкості спресування (через це найбільше ущільнюється лише поверхневий шар);
- г) час витримки під тиском – при збільшенні часу витримки під тиском зростає міцність таблетки, оскільки матеріал краще ущільнюється, однак його збільшення може значно зменшити продуктивність агрегату.

Розглянемо процеси що супроводжують таблетування.

Вплив тиску на міцність таблетки і густину зображені на рис. 5.5.

Лінія 1 відображає міцність таблетки (σ); лінія 2 – зміну питомої густини таблетки (ρ). АВ – зростання σ і ρ за рахунок ущільнення і збільшення поверхні контакту; ВС – накопичення напруження в пористій заготовці; СД – деформування частин і додаткове ущільнення; ДЕ – додаткове ущільнення з руйнуванням частин.

Видно, що після точки В процес малоефективний і викликає небажані зміни в сировині. Отже, процес не ведуть вище P_{opt} внаслідок малої ефективності процесу і погіршення гранулометричного складу прес-матеріалу.

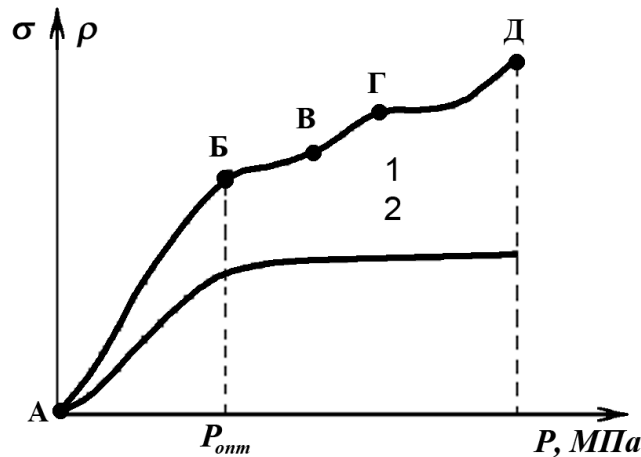


Рис. 5.5. Вплив тиску таблетування на міцність таблетки

Якість таблетки значно залежить від умов спресовування. Загалом умови визначаються методом прикладання зусилля: одностороннє, двостороннє і одностороннє з плаваючою матрицею (рис. 5.6).

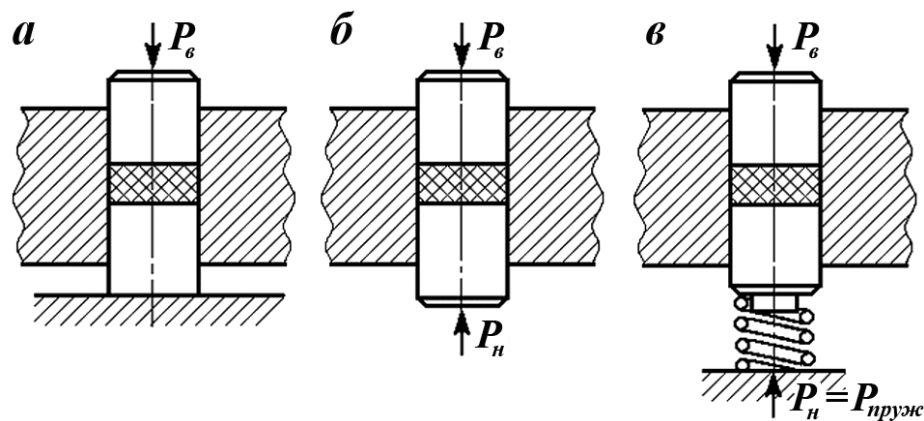


Рис. 5.6. Умови спресовування:

$$a) P_n = P_e - \Sigma \Delta P; \quad б) P_m = P_e + P_n; \quad в) P_n = P_e - \Sigma \Delta P \quad \text{і} \quad P_m = P_e + P_n$$

Двостороннє стискання досягається і при плаваючій матриці за рахунок виникнення зусилля пружності в пружині після її стискання (при передачі P_e). При двосторонньому стисканні σ таблетки збільшується на $15 \div 25\%$. Така таблетка більш однорідна, як це видно з епюр розподілу тиску і густини в матеріалі (рис. 5.7).

При односторонньому стисканні в результаті внутрішнього і зовнішнього тертя у формі створюється значний опір зусиллю стискання, в результаті чого щільність і міцність таблетки зменшується по висоті і від стінки до середини.

Результуючий тиск (P_m), який виникає при стисканні визначає міцність таблетки і в цьому випадку буде різний і становитиме для випадку а) – $P_m = P_e - \Sigma \Delta P$, а для випадку б) – $P_m = P_e + P_n$, де P_e і P_n відповідно зусилля верхнє і нижнє, $\Sigma \Delta P$ – втрати тиску на тертя між частинками.

Слід зауважити, що компактність укладання (пакування) за висотою таблетки впливає на процес попереднього підігріву як функція теплопровідності. Нерівномірність густини може викликати нерівномірність нагріву і нерівномірність розподілу (розтікання) матеріалу в прес-формі, що вплине на якість виробу.

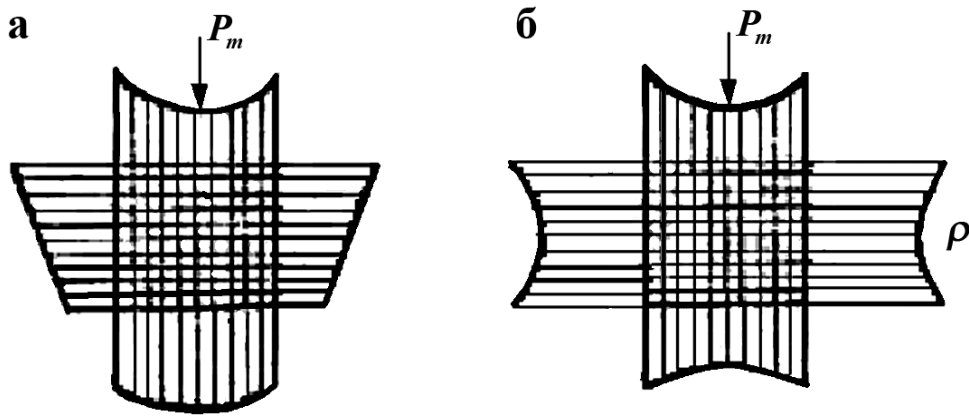


Рис. 5.7. Етюри розподілу P_m і ρ по висоті таблетки
а – одностороннє; б – двостороннє

Попередній підігрів прес-матеріалу. Якщо під час пресування РП прес-матеріал завантажується холодним (особливо таблетований), значно утруднюється процес формування. Внаслідок поганої теплопровідності топлення матеріалу в прес-формі проходить з поверхні, тому сировина у формі буде неоднорідна за в'язкістю. Після змикання прес-форми необхідна витримка для остаточного топлення зв'язного і вирівнювання температури в усьому об'ємі, що подовжує тривалість процесу. Для усунення цього недоліку дуже часто проводять попередній підігрів матеріалу до температури розм'якшення зв'язного за межами прес-форми. Підігрів можна здійснювати: а) в повітряних термошафах; б) з допомогою інфрачервоного випромінювання; в) струмами високої частоти. Останній метод найбільш продуктивний і застосовується найчастіше.

Підігрів високочастотним струмом оснований на перетворенні енергії електромагнітних коливань в теплову в результаті розсіювання енергії при коливному русі полярних груп макромолекул і дипольних молекул мінерального наповнювача, який виникає під дією електромагнітних хвиль струму високої частоти. Потужність генератора, яка перетворюється в теплоту, визначається за виразом:

$$W = 5,5 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot f \cdot E^2, \quad (5.6)$$

де: ε – діелектрична проникність матеріалу; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат матеріалу; f – частота змінного струму; E – напруженість електричного поля

$$|\vec{E}| = U / H, \quad (5.7)$$

де: U – напруга, що подається на пластини генератора, В; H – відстань між пластинами, м.

У заводських умовах використовують генератори з частотою струму $15 \div 40$ МГц, які мають робочу поверхню (стіл) пластин конденсатора 300×300 мм.

З залежності (5.6) видно, що споживана потужність в першу чергу залежить від природи матеріалу: чим більше значення ε і $\operatorname{tg} \delta$, тим більше нагріється матеріал при рівних f і E . Як нам відомо, ε і $\operatorname{tg} \delta$, зростає з збільшенням полярності полімеру. В зв'язку з цим високочастотні діелектрики (поліетилен, пропілен) практично не нагріваються в полі високої частоти. З наповнювачів найбільш сильно розігріваються мінеральні наповнювачі, і процес їх розігріву полягає в їх іонній поляризації і коливанні утворених іонних пар.

Режим попереднього підігріву струмами високої частоти. Параметри процесу.

Режим нагріву включає такі параметри: напруженість електричного поля, час нагріву, температура, до якої нагрівають матеріал.

Напруженість електричного поля є функцією відстані між пластинами, яка повинна бути оптимальною, забезпечувати необхідну температуру нагріву і не призводити до перевищення пробивної напруги матеріалу. Напруженість, як видно з (5.2), регулюється

відстанню H між пластинами при постійній напрузі. Експериментально встановлено, що для феноло–формальдегідних прес-матеріалів $H = 8 \div 12$ мм, для амінопластів $H = 10 \div 14$ мм.

Час прогрівання є важливим параметром процесу, оскільки визначає його продуктивність, впливає на досягнуту температуру і якість матеріалу.

Час підігріву можна визначити експериментально (рис. 5.8).

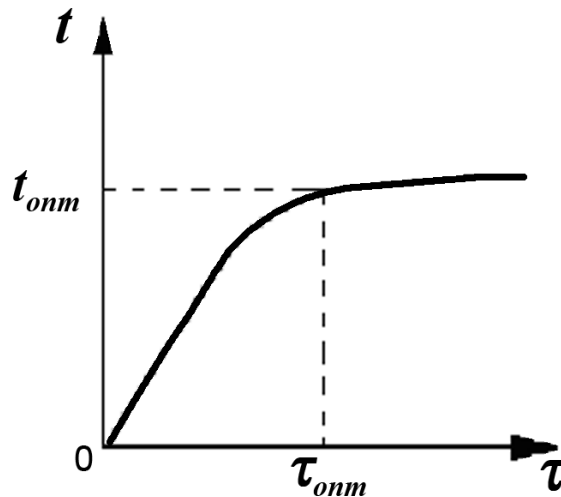


Рис. 5.8. Зміна температури від часу нагріву

Існує і аналітичний метод визначення часу нагріву:

$$\tau_n = \frac{18 \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_n - T_0) \cdot H^2 \cdot 10^3}{K_e^2 \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \text{tg} \delta \cdot \eta_T \cdot U^2}, \quad (5.8)$$

де: ρ і c_p – питомі густина і теплоємність прес-матеріалу; T_n і T_0 – температура матеріалу після і до нагріву; η_m – коефіцієнт втрат теплоти в навколишнє середовище, $\eta = 0,4 \div 0,5$; K_e – коефіцієнт, який враховує вплив на напруженість електричного поля повітряного простору між полімером (прес-матеріалом) і пластиною:

$$K_e = 1 - \alpha \cdot \frac{\delta_e}{H} \sqrt{\varepsilon \cdot \exp \left(-\xi \cdot \frac{\delta_e}{H} \right)}, \quad (5.9)$$

де: δ_e – висота повітряного простору; α і ξ – константи, які залежать від природи зв'язного, так для феноло-формальдегідного прес-матеріалу $\alpha \cong 1,25$, $\varepsilon \cong 2,23$.

Загалом час нагріву на сучасних генераторах складає $10 \div 30$ с і при цьому досягається температура матеріалу $T_n = 80 \div 130$ °С. Час нагріву і температура матеріалу залежать від його природи і від особливостей технологічного процесу формування. Так, $T_n = 120 \div 130$ °С необхідна для прес-матеріалів з великим часом затвердження і при формуванні великогабаритних виробів нескладної конструкції. При пресуванні прес-матеріалу з малим часом затвердження $T_n = 80 \div 120$ °С.

Крім цього, слід пам'ятати, що цикл пресування складає $2 \div 5$ хв, а час нагріву – секунди, тому роботу генератора і преса потрібно узгоджувати, щоб не було перегрівів (оскільки можливі затвердження, деструкція), а також охолодження (при завершенні підігріву задовго до закінчення циклу пресування).

Переваги попереднього підігріву:

1. Можливе підвищення температури пресування на величину до 30 °С.
2. Скорочується час витримки під тиском до 2 раз, що дає підвищення продуктивності.
3. Зростає текучість прес-матеріалу (оскільки забезпечується повне прогрівання і однорідне топлення в об'ємі), внаслідок чого знижується тиск пресування до 50 %, що призводить

також до зменшення енерговитрат і зносу прес-форми. Крім цього, полегшується формування виробів складної конфігурації.

4. Зменшується брак і покращуються властивості виробів за рахунок підвищення однорідності структури за товщиною виробу і зниження внутрішніх напружень.

Недоліки попереднього підігріву:

Можливе швидке затвердження прес-матеріалу в процесі нагрівання, що може призвести до втрати технологічності прес-матеріалу (коли неправильно вибраний режим підігріву, або використовується високореакційне зв'язне).

Завершувальні стадії процесу пресування – це, в першу чергу, механічна обробка, термообробка, склеювання, збирання з елементів, декоративна обробка.

Термообробка (термовідпал або термостабілізація) проводиться при виготовленні великогабаритних різнотовщинних виробів, використовується для усунення можливого жолоблення виробу після зняття його з прес-форми. Операція проводиться при підвищеній температурі, тому сприяє більш повному і рівномірному завершенню процесу затвердження зв'язного та релаксації внутрішніх напружень, що призводить до покращення фізико-механічних властивостей виробу.

Для термообробки, як правило, використовують сухоповітряні термошафи з циркуляцією нагрітого повітря. Термообробку виробів, крім шаруватих пластиків, можна проводити у ваннах з мінеральною оливою.

Виріб вкладають в металеву рамку (оправку) і поміщають в термостат. Операцію інколи називають нормалізацією. Вона полягає в швидкому, короткочасному нагріві до потрібної температури з наступним повільним охолодженням. Як зазначалось, такий процес сприяє релаксації внутрішніх напружень у виробі окрім зрівноваження ступеню зшивання зв'язного.

Механічна обробка полягає у висвердлюванні отворів, фрезеруванні пазів в місцях, де неможливе оформлення їх у формі, а також проводиться для зняття ґрату (переливки). Операція клопітка, вимагає великих трудовитрат, тому її слід максимально автоматизувати і механізувати. Найбільш реальний шлях – це використання верстатів-автоматів і роботів-маніпуляторів. При їх використанні значно скорочуються витрати ручної праці і покращуються умови праці.

Операції склеювання, декорування і збирання вузлів проводяться для надання виробу товарного вигляду.

Переробка відходів. У процесі виробництва при пресуванні неодмінно виникають технологічні відходи – брак, матеріал після запуску обладнання, ґрат. Ці відходи – це затверджений матеріал, який не піддається повторній переробці, а тому довгий час вони вивозились на звалище, що призводило до засмічення навколишнього середовища матеріалами, які не піддаються біодеградації.

Виходячи з екологічної і економічної точки зору, на сьогодні розроблені заходи з утилізації відходів.

Одним з методів використання їх – це спалювання з метою нагрівання технологічних рідин (води, оливи тощо), а також для нагрівання виробничих приміщень. Метод полягає в тому, що тонко подрібнений матеріал упорскується через форсунку у вигляді аерозолу разом з нафтопродуктами і згоряє в печі при температурі до 1000 °С в потоці повітря, збагаченого киснем.

При цьому утворюється CO₂, H₂O з високою температурою та залишається мінеральний шлак у невеликій кількості. Утворені нагріті газу та пара перед викидом в атмосферу проходять через теплообмінник, де нагрівають технологічну рідину, що безперервно перетікає трубами теплообмінника, або ж нагрівають воду з нагрівної системи приміщень.

Другий метод утилізації полягає в тонкому помолі затверджених відходів і повторному додаванні їх (5 – 7 %) як наповнювачів до вихідної сировини при масовому виробництві (невідповідальних) виробів.

б) Стадія формування виробів (пресування)

Стадія пресування полягає в наданні виробу необхідної форми і фізико-механічних властивостей і складається з таких операцій:

- підготовка оснащення (прес-форми);
- дозування і завантаження сировини;
- змикання прес-форми;
- *підпресовки;
- витримка під тиском;
- розмикання форми;
- виштовхування і зняття виробу з форми.
- технологічна пауза.

Стадії, які відмічені зірочкою, залежно від умов виробництва можуть не проводитись/ Розглянемо окремо призначення і суть кожної операції.

Підготовка оснащення при запусканні процесу – це встановлення форми на прес в центрі плит преса співосно дії тиску і закріплення (спочатку до нижньої плити). Потім опускається верхня плита і кріпиться до неї верхня частина форми. Далі встановлюється холостий і робочий хід відповідно до об'єму завантажувальної камери і габаритів форми. Після встановлення форми вмикається її нагрівання та проводиться підготовка формувальних поверхонь.

В процесі роботи: очищається форма від забруднень і змашується антиадгезивною рідиною (віск, стеаринова кислота, силіконова рідина), а також перевіряють хід пуансона і роботу нагрівальних елементів.

Дозування та завантаження сировини. В форму завантажується сировина в кількості, яка дорівнює масі відпресовки плюс технологічні відходи. Як ми вже знаємо, в більшості випадків після дозування проводять попередній підігрів і підігріту сировину подають в форму. Дозування проводять одним з трьох відомих методів вручну або з використанням автоматів, чи роботів-маніпуляторів.

Дозування можливе за допомогою шнекової приставки, яка працює за принципом екструзійного апарату, узгоджено з циклом пресування і подає у відповідний момент у розімкнену і підготовлену форму необхідну дозу гомогенізованої розтопленої сировини. При завантаженні шнековою приставкою значно інтенсифікується процес пресування, підвищується якість виробу, а також є можливість автоматизувати його і здійснювати процес у неперервному режимі. При завантаженні необхідно стежити за розподілом прес-матеріалу в порожнині форми.

Змикання прес-форми. Віддаль між верхньою і нижньою плитою преса завжди перевищує висоту порожнини форми, включаючи завантажувальну камеру, що обумовлене необхідністю вільного і безпечного зняття виробів. Тому для скорочення часу формування (тобто підвищення продуктивності праці) хід пуансона при змиканні ділять на 2 зони: зони холостого (вільного) ходу і робочого ходу. Першу зону пуансон проходить швидко (до контакту його з верхньою частиною матриці – в багатьох випадках це дотик до матеріалу). Зона робочого ходу полягає у спресуванні і розтисканні сировини по всій формувальній порожнині і створення необхідного тиску для надання матеріалу потрібної монолітності. Вона відзначається малою швидкістю ходу пуансона, яка обумовлена запобіганням викидання частини матеріалу з форми, а також для покращення розтікання матеріалу порожниною форми. При малій швидкості руху пуансона зменшується зношувальність прес-форми.

Окремий випадок – після холостого ходу пуансон зупиняють на деякий час (здійснюють паузу). Це проводять, коли:

- низька температуропровідність матеріалу і не було попереднього підігріву;
- прес-матеріал відзначається низькою в'язкістю (високою текучістю);
- формуються різнотовщинні вироби складної конфігурації з тонкою арматурою.

Під час змикання форми можливе проведення підпресовок.

Підпресовки здійснюються після досягнення в формі необхідного тиску пресування і вони полягають у підйомі пуансона на відповідну висоту (короткотривале розмикання форми).

Підпресовки проводяться з метою:

- видалення вологи і летких з прес-матеріалу,
- підвищення монолітності матеріалу;
- покращення затікання прес-матеріалу в порожнину форми.

Вони не проводяться при наявності тонкої арматури, прохідних знаків і при малому часі затвердження прес-матеріалу ($\tau_{зам}$). Підпресовки в зв'язку з цим проводять для покращення якості виробу, підвищення його фізико-механічних властивостей, рівнотовщинності, монолітності і зменшення браку. Крім цього, підпресовки призводять до зменшення часу витримки під тиском (час на затвердження). Як це видно з рис. 5.8 час може зменшуватись до 40 %, що дозволяє інтенсифікувати процес пресування взагалі, оскільки стадія витримки під тиском є найтривалішою. Скорочення часу швидше всього пов'язане з підвищенням швидкості затвердження внаслідок додаткового видалення води і летких речовин, які гальмують реакцію за законом Ле-Шательє у рівноважних процесах, як побічний процес реакції.

З рисунка видно, що оптимальною кількістю підпресовок є $2 \div 3$, максимально – 4.

Підпресовки характеризуються такими параметрами:

1. Інтервал підпресовок – час, протягом якого можна їх проводити. Цей час рівний часу перебування матеріалу у в'язкопластичному стані.
2. Початок підпресовок – час від змикання форми до першого підйому пуансона. За цим параметром розрізняють:
 - ранні підпресовки, коли перший підйом пуансона проводять в часі до 10 с після змикання;
 - пізні підпресовки – до 30 с.
3. Тривалість підпресовки – час, протягом якого форма перебуває в розімкненому стані: для швидкозатверднучих матеріалів цей час становить 5 с, для інших – до 10 с.
4. Висота підйому пуансона:
 - низькі підпресовки – до 10 мм,
 - високі підпресовки – до 30 мм.

Взагалі, висота визначається конструкцією форми і висотою виробу.

5. Кількість підпресовок встановлюють експериментально (за якістю виробу), оптимальну – за допомогою графіка, зображеного на рис. 5.9. Розглянемо цикл пересування з підпресовками.

В загальному цикл пресування – це всі операції, які складають стадію пресування (формування виробу) і включає такі часи на: змикання форми, витримку під тиском (в який входить час підпресовок), розмикання форми, знімання виробу і технологічну паузу. Отже цей процес можна зобразити циклограмою зображеною на рис. 5.10.

Витримка під тиском – найтриваліша і відповідальна операція, оскільки залежить від швидкості затвердження зв'язного і впливає на якість виробу і продуктивність процесу. Проводиться з метою повного (остаточного) оформлення виробу з необхідними фізико-

механічними властивостями. Тривалість операції залежить від теплофізичних і технологічних характеристик прес-матеріалу і від технологічного режиму пресування (P , T , підпресовки, попередній підігрів). Час витримки включає нагрів до повного топлення матеріалу його монолітизації і затвердження зв'язного. Як зазначалось, на час витримки впливає і попередній підігрів та таблетування.

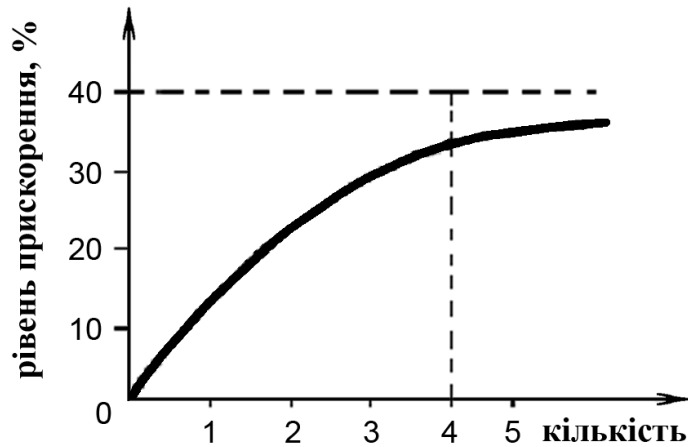


Рис. 5.9. Вплив кількості підпресовок на швидкість процесу формування

Окремий випадок: пресування шаруватих пластиків. В даному випадку витримка під тиском проводиться протягом повного затвердження зв'язного без підпресовок, включаючи повне охолодження виробу. Через погану теплопровідність пластику процес досить довготривалий і час залежить від товщини відформованого пакету.

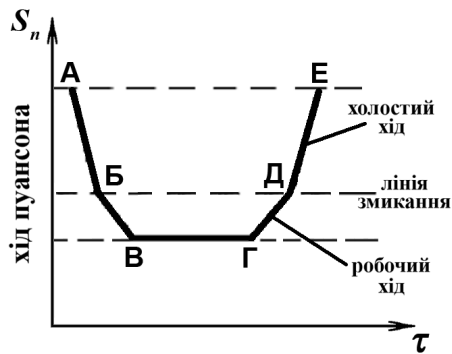
Розмикання форми і зняття виробів. Ця операція включає: розмикання – підйом пуансона (робочий і холостий хід); виштовхування виробу з порожнини форми виштовхувачами; видалення виробу з проміжку між півформами і подача його на наступну операцію. Видалення виробу і переміщення на наступну стадію пов'язано з контактом з гарячою поверхнею, яка має високу температуру (затвердження відбувається при високій T_{np}), крім цього, можливі дотики до високонагрітої поверхні форми, а також не виключено дотик до пуансона. Все це може призвести до травматизму. Тому з метою інтенсифікації процесу, зменшення ручної праці і з метою охорони праці і техніки безпеки слід використовувати для зняття і переміщення виробів роботи-маніпулятори. Викручування різьбознаків слід здійснювати при допомозі механічних пристосувань, які б працювали узгоджено з маніпуляторами, або з розмиканням форми.

Після зняття виробу охолоджуються природним шляхом. Великогабаритні вироби для запобігання жолоблення охолоджуються в штивній оправці. В такій оправці вироби відразу можуть подаватись на термостабілізацію. При відсутності механічних пристроїв знімання виробів їх знімають вручну, користуючись теплоізоляційними рукавицями.

На наступній операції вироби можуть подаватись складені у тарі, або ж за допомогою стрічкового конвеєра.

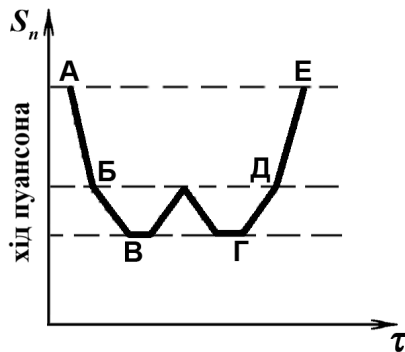
Пресування – це найбільш трудомісткий процес, який на сьогоднішній день на багатьох виробництвах вимагає великої частки ручної праці. Тому, враховуючи корисність пресування, і його незамінність в багатьох випадках пресування великогабаритних, а також теплостійких, висококомічних виробів, слід вживати заходи до його інтенсифікації, зменшення ручної праці, автоматизації виробництва.

Зменшення ручної праці, як вже зазначалось вище, можливе при використанні механізованих чи автоматизованих пристроїв завантаження, дозування, зняття та сортування виробів: це роботи-маніпулятори, шнекові приставки-дозатори, автомати-дозатори і автомати-сортувальники.



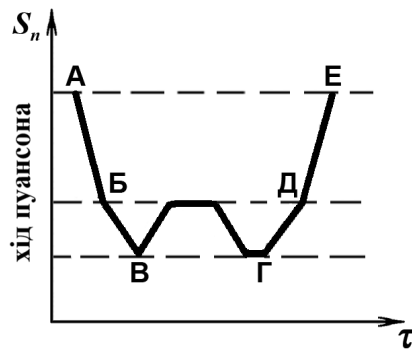
а) Пресування без підпресовок

Цей режим використовується для пресування невеликих виробів з малою товщиною стінки (до 5 мм).



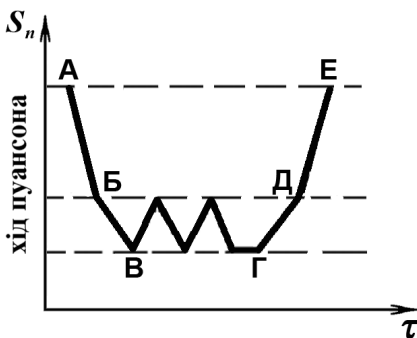
б) З підпресовками

При формуванні товстостінних виробів великих розмірів з матеріалів, в яких час затвердження є великий: товщина стінки більша за 5 мм або велика висота виробу. Тут додатково прогривають під тиском.



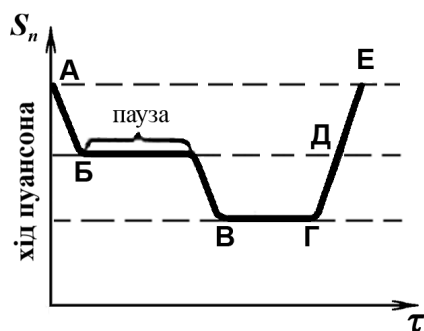
в) Підпресовка з паузою

При формуванні товстостінних виробів з арматурою або знаками. Матеріал з невисокою реакційною здатністю.



г) Підпресовка без паузи

При формуванні виробів великої площі і товщини без арматури і знаків.



д) Підігрів матеріалу в прес-формі (пресування після паузи)

При переробці матеріалів з високою текучістю і великим часом затвердження, наприклад, амінопластів. Режим зменшує знос форми. Використовується також при наявності тонкої арматури та прохідних знаків.

Рис. 5.10. Циклограма процесу пресування:

АБ – холостий хід змикання; БВ – робочий хід змикання; ВГ – витримка під тиском;
ГД – розмикання, робочий хід; ДЕ – розмикання, холостий хід

Використання цих засобів дає можливість проектувати повністю автоматизований технологічний процес. Але в цьому випадку потрібна механізація і автоматизація транспорту (пневмотранспорт, конвеєр, вакуум-транспорт). Крім цього, автоматизація лінії можлива при великосерійності виробництва виробів з однієї марки прес-матеріалу (понад 0,5 млн. шт.).

При створенні автоматизованої технологічної лінії вирішують проблеми автоматизації і механізації процесів:

1. переміщення сировини цеховою лінією;
2. завантаження і дозування сировини;
3. автоматизація стадії формування;
4. зняття виробу, сортування і пакування.

Перспективний шлях сучасного виробництва – використання роторних пресових ліній, коли стадії і цикл пресування здійснюються послідовним переміщенням оснащення лінією і, при цьому, відсутні затримки на кожній стадії, а операції циклу відбуваються одночасно.

5.1.1.3. Технологічні параметри компресійного пресування. Методи їх визначення

Технологічні параметри – це сукупність тих умов, які забезпечують отримання якісного виробу при необхідній продуктивності. До них належать:

- температура і час попереднього підігріву;
- температура пресування;
- тиск пресування;
- підпресовки (їх параметри);
- час витримки під тиском (τ_6);
- цикл процесу формування (τ_u).

Цикл – це час, протягом якого здійснюються всі операції пресування (перелічені вище), Розподіл часу за операціями стадії пресування представлено на рис. 5.11.

Як бачимо з циклограми, витримка під тиском є визначальною (лімітуючою) операцією формування – час витримки є найбільшим.

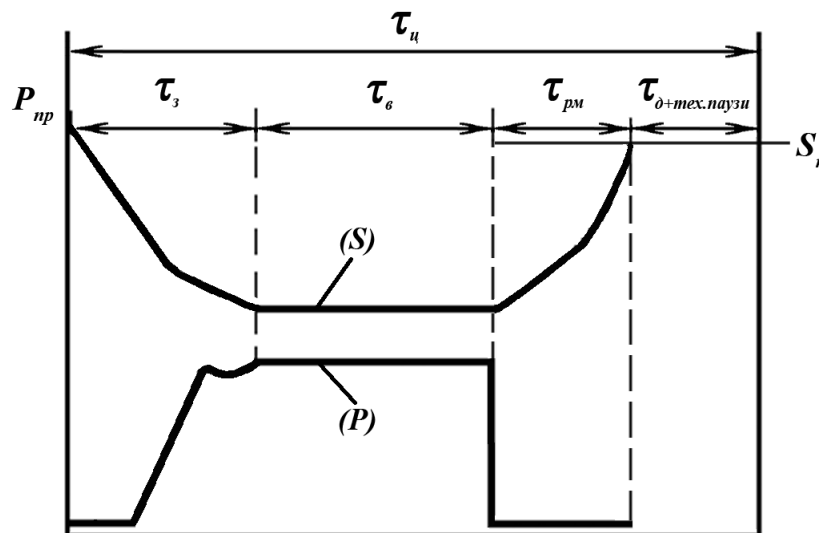


Рис. 5.11. Циклограма пресування: $P_{пр}$ – за тиском; S_n – за ходом пуансона; τ_3 – час на змикання; τ_6 – час витримки під тиском; τ_0 – час дозування; $\tau_{рм}$ – час розмикання; $\tau_{тех.паузи}$ – час на підготовку форми; S_n – хід пуансона

Розглянемо окремо кожний параметр.

Температура пресування встановлюється такою, яка б забезпечувала в'язку течію прес-матеріалу під дією тиску і необхідну швидкість затвердження зв'язного. Температура залежить від технологічних характеристик прес-матеріалу, габаритів і конфігурації виробу,

наявності стадії попереднього підігріву і, в першу чергу, визначається типом зв'язного. Так, фенопласти пресують при $150 \div 190$ °С, амінопласти – при $135 \div 150$ °С. За температуру пресування приймається істинну температуру прес-матеріалів в формі (рис. 5.12) і встановлюється, в основному, на основі даних типових технологічних процесів переробки РП, з використанням державних стандартів і стандартів на матеріал (додаток 3). Вона забезпечується відповідним нагрівом матриці і пуансона до потрібної температури (відповідно t_m і t_n).

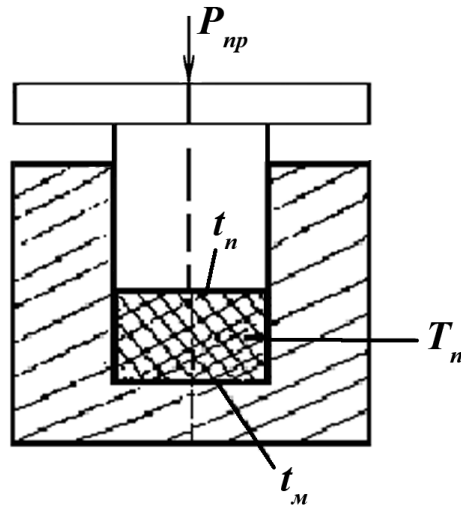


Рис. 5.12. Схема розподілення температури у формі:
 t_m – температура стінки матриці, $t_m = t_{np} + (10 \div 20$ °С);
 t_n – температура стінки пуансона, $t_n = t_m + (0 \div 10$ °С)

Існує три методи встановлення t_{np} :

- з рекомендацій, які беруть з описів типових технологічних процесів переробки конкретного матеріалу; з державних стандартів і стандартів на матеріали, із довідників з переробки пластмас;
- з лабораторних визначень технологічних характеристик (температура і час затвердження);
- аналітичним шляхом.

Використовують простий метод розрахунку визначення температури пресування, зокрема температура форми (температура стінки матриці) може бути визначена з залежності:

$$t_m = t_0 + (\ln \tau_{nl} - \ln \tau_{nl}^0) / \gamma_1, \quad (5.10)$$

де: t_0 – температура стандартного пластометричного випробування; τ_{nl} – час перебування прес-матеріалу у в'язкотекучому стані при T_{np} ; τ_{nl}^0 – час в'язкотекучого стану при стандартному пластометричному випробуванні; γ_1 – температурний коефіцієнт, який залежить від природи прес-матеріалу.

Такий метод визначення t_m придатний при формуванні малогабаритних тонкостінних (до 5 мм) виробів.

Оскільки час пресування залежить від швидкості затвердження, то з метою інтенсифікації процесу прагнуть пресувати при якомога вищих температурах (T_{np}).

Але поряд з перевагами від підвищення температури, які полягають у підвищенні швидкості затвердження і в покращенні якості зовнішньої поверхні з підвищеною твердістю, існує ряд недоліків.

- В результаті інтенсивного („миттєвого“) затвердження на поверхні від контакту з надто нагрітими частинами форми утворюється поверхнева кірка, яка запобігає виділенню реакційної вологи і летких з об'єму і в зв'язку з цим призводить до появи браку у вигляді

товстостінного здуття, кратерів, нерівностей на поверхні виробів після знімання. Крім цього, внаслідок поверхневого тверднення і утруднення виділення вологи сповільнюється процес поліконденсації в об'ємі, що призводить до неоднорідності матеріалу по січенню стінки і погіршення фізико-механічних характеристик виробів. Це в більшій мірі проявляється для товстостінних виробів. Для таких виробів характерне в цьому випадку короблення (згинання, скривлення).

2. Висока температура викликає переливку (грат), внаслідок збільшення текучості.
3. Надмірно висока температура може спричинити деструкцію полімеру, яка посилюється екзотермією реакції затвердження. Обвуглюватись може і органічний наповнювач. Деструкція закономірно більш імовірна в товстостінних виробах внаслідок більшої екзотермії реакції поліконденсації.

Тому понижені температури пресування використовують при пресуванні:

- товстостінних і великогабаритних виробів;
- матеріалів з підвищеним вмістом вологи;
- високореакційних прес-матеріалів з малим часом затвердження і низькою текучістю, оскільки в протилежному випадку можливе неповне формування виробу (недопресовки).

У зв'язку з різним впливом температурного градієнта на технологічний процес в кожному випадку необхідне визначення оптимальної температури пресування.

Аналітично-експериментальний метод визначення температури пресування.

Розглянемо цей метод визначення T_{np} . При розрахунку T_{np} використовують умову зберігання прес-матеріалом в'язкотекучого стану при цій температурі хоча б протягом остаточного заповнення порожнини форми при її змиканні, тобто на час, який необхідний для прийняття матеріалом форми виробу (τ_ϕ) при пресуванні. Ця умова окреслюється залежністю: $\tau_\phi \leq \tau_{nl} + 10$ – беруть запас часу 10 с; τ_{nl} – час перебування у в'язкопластичному стані. Запас 10 с береться на завантаження і змикання форми.

Таким чином, можемо записати, приймаючи мінімальний запас:

$$\tau_\phi = \tau_{nl} + 10, \text{ с}, \quad (5.11)$$

З одного боку, τ_ϕ – це час, який необхідний на холостий і робочий хід пуансона з урахуванням підпресовок:

$$\tau_\phi = \frac{S_x}{v_x} + \frac{S_p}{v_p} \cdot [(n-1)] + n \cdot \Delta, \quad (5.12)$$

де: S_x і S_p – холостий і робочий хід пуансона; v_x і v_p – відповідно швидкість вільного і робочого ходу пуансона; n – кількість підпресовок; Δ – тривалість підпресовки.

Використовуючи геометричні і кінематичні дані преса, ми можемо обчислити з (5.12) τ_ϕ , а знаючи його – визначити τ_{nl}^{proz} з (5.11) – це мінімальний час, який необхідний для здійснення операції формування.

З другого боку, нам відомо, що τ_{nl} залежить від температури пресування і природи зв'язного. Ця залежність описується наступною формулою:

$$\tau_{nl} = \tau_{nl}^0 \cdot e^{\beta(t_0-t)}, \quad (5.13)$$

де: τ_{nl} і t_0 – стандартні час і температура – з досліду стандартного випробування на приладі Канавця, або табличні дані (з стандартів на матеріал); β – коефіцієнт, який залежить від природи прес-матеріалу (його реакційної здатності); t – будь-яка (біжуча) температура пресування.

Підставляючи різні значення t в (5.13), отримуємо залежність, яка зображена на рис. 5.13.

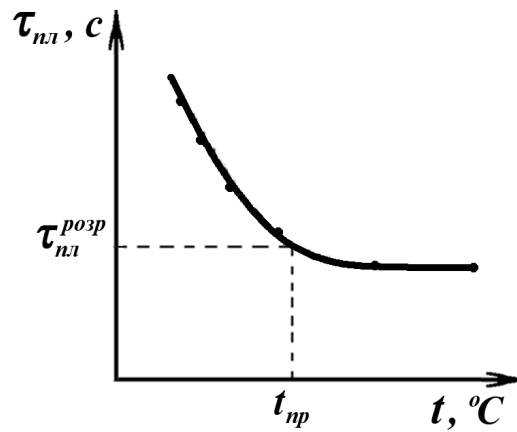


Рис. 5.13. Залежність тривалості перебування у в'язкопластичному стані від зміни температури пресування

На графіку відкладаємо розраховане $\tau_{пл}^{розр}$ і визначаємо необхідну температуру пресування ($t_{нр}$) при визначеному вище мінімальному часі формування.

Даний метод не враховує групу складності виробу, його габарити і вміст вологи в сировині. Тому $t_{нр}$ уточнюють експериментально.

Використовуючи розрахункове значення $\tau_{пл}^{розр}$, можна визначити температуру попереднього підігріву:

$$\tau_{пл}^{розр} = \left(\frac{S_x}{v_x} + \frac{S_p}{v_p} \right) + \tau_3, \quad (5.14)$$

або

$$\tau_{пл} \geq \tau_\phi + \tau_3, \quad (5.15)$$

де: τ_3 – час на завантаження матеріалу у форму.

При сумісному розв'язуванні (5.13) і (5.14) і при умові, що попередній підігрів забезпечить умову (5.14), отримаємо:

$$T_{нр} \leq \frac{U}{R} \cdot \left(\ln \frac{S_x}{v_x} + S_p \cdot (v_p + \tau_3) - \ln A \right) + \tau_3, \quad (5.16)$$

де: U – стала, яка визначається з енергії активації реакції затвердження; R – газова стала; A – передекспоненціальний множник.

Для деяких матеріалів U і A мають наступні значення:

	ОЗ-010-02	ЭЗ-340-65	Э2-330-02
$A \cdot 10^7$	1,77	7,4	1760
U , кДж/моль	69,5	62,8	47,31

Як зазначалось вище, температура пресування суттєво впливає на час витримки під тиском і якість виробу.

Час витримки під тиском залежить від температури пресування, теплопровідності прес-матеріалу і товщини виробу, а також від наявності попереднього підігріву. Він визначається лабораторним (дослідним) способом – на пластометрі Канавця (див. вище), або шляхом пресування стандартного “стаканчика”. Визначений час може бути використаний для пресування тонкостінних виробів (до 5 мм). Для товстостінних виробів через низьку теплопровідність матеріалу прогрів його в об'ємі сповільнюється, через це подовжується час витримки. Залежність часу витримки від товщини обумовлює вивід питомої витримки на 1 мм товщини виробу. Ця характеристика і приводиться в стандартах і таблицях з характеристикою прес-матеріалу (додаток 3).

В інженерних розрахунках використовують аналітичний розрахунок часу витримки, (с):

$$\tau_{\text{вум}} = \frac{1}{K_2} \cdot \frac{h^2}{4\alpha} \cdot \ln \left(K_1 \frac{t_m - t_0}{t_m - t} \right) + 0,85 \cdot (\tau_{\text{оме}} - \tau_{\text{нл}}) \cdot e^{(t_0 - t_c + 4)}, \quad (5.17)$$

В цьому рівнянні перший член рівняння враховує час, витрачений на нагрівання матеріалу до $t = t_{np}$, а другий – час на затвердження; K_1 і K_2 – коефіцієнти, які залежать від конфігурації виробу і швидкості його прогріву при контактній теплопередачі; α – коефіцієнт температуропровідності прес-матеріалу, $\text{м}^2/\text{с}$; t_m – температура поверхні прес-форми, $^{\circ}\text{C}$; (див. рис. 5.11), t_0 – температура попереднього підігріву, $^{\circ}\text{C}$; t – температура пресування ($t_{np} = t_m - 20$ $^{\circ}\text{C}$); $\tau_{\text{змс}}$ – час затвердження матеріалу, визначений на пластометрі при t_0 , с; $\tau_{\text{нл}}$ – час перебування матеріалу у в'язкопластичному стані, який дорівнює часу нагріву матеріалу до температури $t_0 - 4$ $^{\circ}\text{C}$, K_1, K_2 – коефіцієнти, які залежать від форми виробу:

	пластина	циліндр	куля
K_1	1,27	1,6	2
K_2	2,47	5,79	9,86

Залежність (5.17) покладена в основу номограми, розробленої А.Д. Соколовим для визначення часу витримки (дод. 1), в якій враховується товщина стінки виробу, його конфігурація і температура пресування.

Таблиця 5.1.

Характеристики прес-матеріалів

Марка прес-матеріалу	t_0 , $^{\circ}\text{C}$	τ_0^H , с	γ , $1/^{\circ}\text{C}$	$\tau_{\text{змс}}$, с	α
01-040-02	170	19	0,032	130	–
К-17-2	170	19	0,030	90	–
03-010-02	170	19	0,030	80	0,05
Э1-340-02	170	19	0,020	160	–
СП 2-342-02	170	19	0,020	150	0,042
СП 3-342-02	170	19	0,020	160	–
Э2-330-02	170	19	0,025	140	0,02
АГ-4	170	19	0,035	125	–
Амінопласт	140	10	0,028	130	–
К-79-79	140	100	0,032	210	–

Слід зазначити, що витримка під тиском скорочується при наявності підпресовок (див. вище) і при попередньому підігріві. Підвищення t_{np} на 10 $^{\circ}\text{C}$ скорочує витримку у 1,2 ÷ 1,3 рази. Питомий тиск пресування має складніший вплив. До 80 МПа тиск зменшує $\tau_{\text{вум}}$, після 80 МПа витримка дещо подовжується. Це пов'язано, скоріше за все, з різною швидкістю дифузії реакційної вологи, яка закономірно залежить від тиску. Цілком зрозуміло, що сповільнення виділення з зони реакції вологи призведе до сповільнення цієї реакції.

Тиск (зусилля) пресування. Питомий тиск. Як зазначалось, тиск в прес-формі створюється для ефективного розтікання прес-матеріалу порожниною і його ущільнення з метою отримання виробу необхідної монолітності і міцності.

Зусилля пресування визначається з залежності:

$$P_{np} = P_{\text{нлт}} \cdot F_{\text{вир}} \cdot n \quad \text{або} \quad P_{np} = P_{\text{нлт}} \cdot F_{\text{зк}}, \quad (5.18)$$

де: $P_{\text{нлт}}$ – питомий тиск пресування; $F_{\text{вир}}$ і $F_{\text{зк}}$ – відповідно площа виробу у площині розмикання (перпендикулярна до дії тиску) і завантажувальної камери (у випадку відкритих форм); n – гніздність оснащення в багатогніздних формах; при одній завантажувальній камері $n = 1$.

Питомий тиск ($P_{\text{нлт}}$) – тиск, який прикладається на одиницю площі, є характеристикою прес-матеріалу і залежить від його природи. $P_{\text{нлт}}$ знаходять аналітично (дод. 2), чи для його

знаходження використовують стандарти на матеріали, дані типових технологічних процесів і існуючі універсальні номограми для визначення параметрів пресування. Питомий тиск залежить від форми, габаритів, ступеня складності виробів і гніздності оснащення, висоти і товщини стінки виробу. В стандартах і таблицях приводиться інтервал P_{num} , конкретне значення з якого вибирають з урахуванням ряду факторів. Вплив факторів на P_{num} :

- а) текучість має обернений вплив – чим вища текучість, тим нижчий P_{num} , (текучість залежить від t_{np});
- б) попередній підігрів зменшує P_{num} від 20 до 80 %;
- в) габарити виробу – чим більші габарити (площа, товщина стінки, лінійні розміри), тим більше потрібно підвищувати P_{num} , оскільки при розтіканні на великій нагрітій площі втрачається текучість через реакцію затвердження;
- г) гніздність може викликати підвищення P_{num} внаслідок нерівномірності висот матриці і пуансона в окремих гніздах;
- д) висота деталі впливає на P_{num} прямопропорційно. Існує граничне співвідношення між висотою і товщиною стінки виробу, до якого можливе формування якісного виробу. Залежність висоти заповнення прес-форми (H) від товщини стінки виробу (δ) зображено на рис. 5.14.

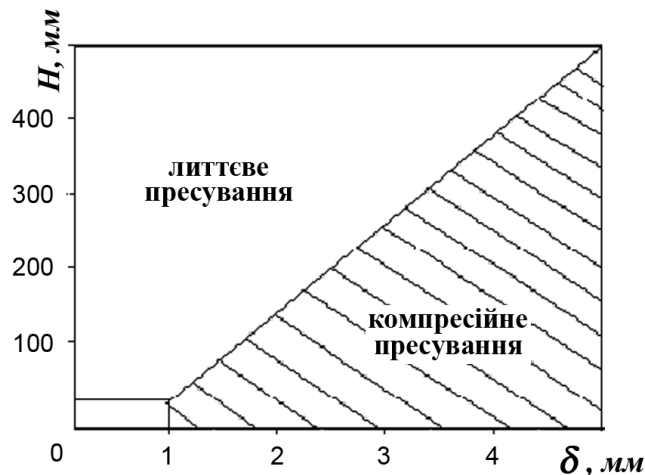


Рис. 5.14. Вплив відношення товщини стінки виробу (δ) і висоти стінки (H) на тиск пресування

Заштрихована (“надійна”) область пресування, вище якої P_{np} недостатній для одержання якісного виробу методом компресійного пресування. Отже, чим більше значення H/δ , тим вищий P_{num} .

- е) наявність арматури у виробі також потребує підвищення P_{num} з метою надійної опресовки вставки;
- ж) використання таблеток, максимально наближених за розміром до розмірів виробу, зменшує P_{num} і відповідно, P_{np} через те, що потрібне менше зусилля на розтікання матеріалу порожниною;
- з) при розрахунку зусилля пресування за формулою (5.18) не враховуються втрати тиску на внутрішнє тертя в матеріалі і тертя матеріалу об стінки при розтіканні, які можуть складати до 9 % на кожний сантиметр глибини оформлюючої порожнини. Тому для пресування товстостінних і високих виробів (> 1 см) потрібно враховувати ці втрати. Тоді зусилля пресування визначають:

$$P'_{np} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot P_{np} + \pi \cdot d \cdot \left[f \cdot P_{np} \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot L \cdot f}{d} \right) \right], \quad (5.19)$$

де: P_{np} – розраховане зусилля пресування за (5.18); d – діаметр пуансона прес-форми ($d = \sqrt{4SL/\pi}$); L – глибина формувальної порожнини форми; f – коефіцієнт тертя матеріалу об сталь ($f \approx 0,2 \div 0,3$).

На втрати тиску впливає попередній підігрів (рис. 5.15).

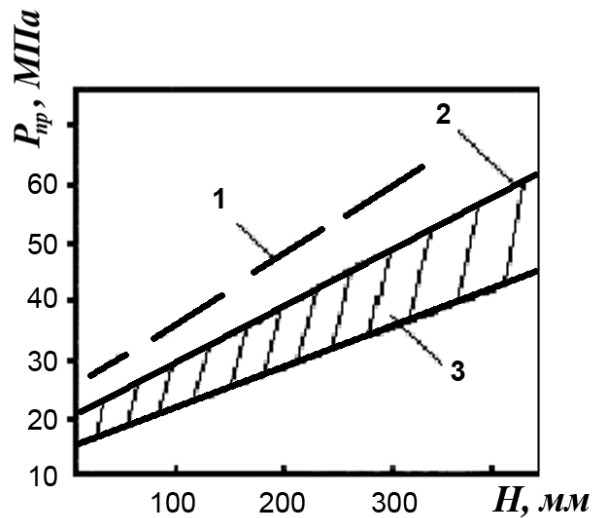


Рис. 5.15. Вплив висоти виробу на тиск пресування:

1 – без попереднього нагріву; 2, 3 – з попереднім нагрівом; H – висота порожнини форми (або висота стінки виробу); 2 – з урахуванням втрат на тертя; 3 – без урахування втрат на тертя

Як відомо, при наявності попереднього підігріву тиск пресування понижується внаслідок зменшення втрат тиску на тертя.

У технологічну карту записують тиск на манометрі. Тиск на манометрі преса визначається з залежності:

$$P_m = \frac{P_{num} \cdot F_{вир} \cdot (n)}{K \cdot F_n}, \quad (5.20)$$

де: $F_{вир}$ і F_n – площі виробу в площині розмикання форми і перетину плунжера преса; K – коефіцієнт корисної дії преса, $K = 0,6 \div 0,8$.

Розраховане зусилля пресування перевіряється експериментально. При надто високому тиску появляється брак – розводи на поверхні і “висипка” (коли висока текучість), а також – переливка. “Висипка” – внаслідок розділення дисперсного наповнювача і зв’язного.

Знайдені параметри складають технологічний режим переробки, який приводиться в технологічних картах і поопераційних інструкціях. Для переробки реактопластів рекомендовані параметри: температура пресування $130 \div 180$ °С, питомий тиск пресування $15 \div 45$ МПа, час витримки під тиском $1,1 \div 2,5$ хв/мм (дод. 3).

Розрахунок дози прес-матеріалу. Для забезпечення формування виробів товарного вигляду необхідне досить точне дозування сировини. В ідеальному випадку доза повинна дорівнювати масі виробу, але при дозуванні і завантаженні у форму та при формуванні можливі технологічні втрати. Відхилення можливі через коливання маси таблетки, технологічних параметрів тощо.

У зв’язку з цим проводять розрахунки. Для закритих прес-форм доза визначається за формулою:

$$G_H = 1,05 \cdot (G_B \cdot n + K_1 + K_2), \quad (5.21)$$

де: n – гніздність; K_1 – коефіцієнт, який враховує текучість за Рашигом; 1,05 – враховує втрати (значення усереднені, однак для кожного конкретного випадку уточнюються експериментально); K_2 – коефіцієнт, який враховує коливання маси таблетки:

$$K_2 = g \cdot f / 2, \quad (5.22)$$

де: g – відхилення маси таблетки; f – кількість таблеток, що завантажено. Існують експериментальні дані залежності g від маси таблетки:

маса таблетки, г	$2 \div 6$	$6,1 \div 20$	$20 \div 40$
$g, \text{ г}$	$0,1 \div 0,2$	$0,2 \div 0,3$	$0,3 \div 0,4$

K_1 змінюється від 0,1 до 8,0 при зміні текучості від 80 до 180 мм при масі виробу від 1 г до 500 г.

При пресуванні у напівзакритих і відкритих прес-формах доза дорівнює:

$$G_H = 1,05 \cdot (G_B \cdot n + K_1 + K_2 + \rho + \bar{b}_o + F_{зк}), \quad (5.23)$$

де: ρ – густина матеріалу; $F_{зк}$ – площа завантажувальної камери; \bar{b}_o – товщина переливки (0,02 ÷ 0,1 см).

При литтєвому пресуванні доза враховує залишки у ливникову циліндрі:

$$G_H = 1,05 \cdot (G_B \cdot n + K_1 + K_2 + G_{л} + G_n + G_o), \quad (5.24)$$

де: $G_{л}$ – маса матеріалу в ливникових каналах; G_n – маса залишкового матеріалу в циліндрі; G_o – маса переливки.

Брак при пресуванні. Поява браку викликана відхиленнями технологічних характеристик прес-матеріалу, технологічних параметрів пресування, поломками обладнання і недосконалістю оснащення. На практиці зустрічається близько 20 видів браку, основними з яких є: включення – 27 %; сірість – 21 %; недопресовки – 9 %; здуття – 7 %; розводи – 6 %; жолоблення – 4 %; тріщини – 4 %; товстий ґрат – 2 %; розшарування – 2 %. Причини браку наведені в додатку 5.

Переваги компресійного пресування: простота і доступність методу; відносна дешевизна оснащення; можливість формування великогабаритних виробів підвищеної міцності і теплостійкості.

Недоліки компресійного пресування: тривалий цикл формування (до 5 хв) і велика трудомісткість процесу; велика частка браку; неможливо формувати вироби з тонкою арматурою і тонкими отворами, оскільки при змиканні можливе їх відхилення; ускладнене формування тонкостінних та різнотовщинних з високою стінкою виробів.

5.1.2. Литтєве пресування

Цей спосіб переробки відрізняється від компресійного пресування тим, що матеріал завантажується в завантажувальну камеру (циліндр) прес-форми, де він переходить у в'язкопластичний стан, а потім під дією тиску перетискається через ливник у формувальну порожнину. В зв'язку з цим матеріал в формувальній порожнині вже однорідний в об'ємі за температурою і гомогенізований у в'язкотекучому стані, оскільки зазнає дії великих напружень зсуву при течії через канали.

Розтоп подається в попередньо зімкнуту з відповідним зусиллям форму, котра нагріта до температури пресування (рис. 5.16). Під час литтєвого пресування не використовуються підпресовки.

Для формування виробів литтєвим пресуванням використовуються прес-матеріали з великим часом перебування у в'язкопластичному стані і з підвищеною текучістю. При литтєвому пресуванні, як правило, використовується попередньо нагрітий прес-матеріал.

Цей метод є доцільний, коли потрібно формувати різнотовщинні, тонкостінні вироби з високою стінкою (велике H/δ – див. рис. 5.14) або ж при наявності тонкої прохідної арматури і знаків.

Фізико - хімічні явища, які відбуваються при литтєвому пресуванні є наступні:

- топлення прес-матеріалу і нагрівання його до температури упорскування;
- течія розтопу з великим напруженням зсуву;

- випаровування летких і вологи з розтопу у порожнині форми;
- стискання і ущільнення матеріалу;
- затвердження прес-матеріалу за рахунок структурування зв'язного;

Не бажане явище – деструкція полімеру, котра може виникнути при неправильному температурному режимі пресування.

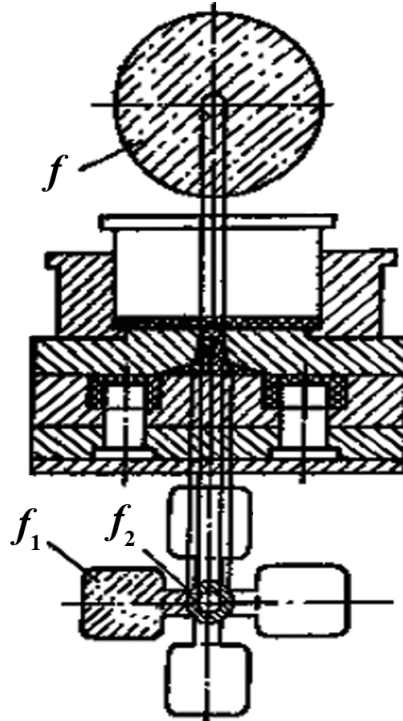


Рис. 5.16. Схема литтєвого пресування у 4-х гніздіній формі з верхньою завантажувальною камерою; f , f_1 , f_2 – площа перерізу відповідно штока, центрального ливника і гнізда форми в площині роз'єму

Залежно від конструкції форми лиття здійснюється зверху (а) чи знизу (б), рис. 5.17.

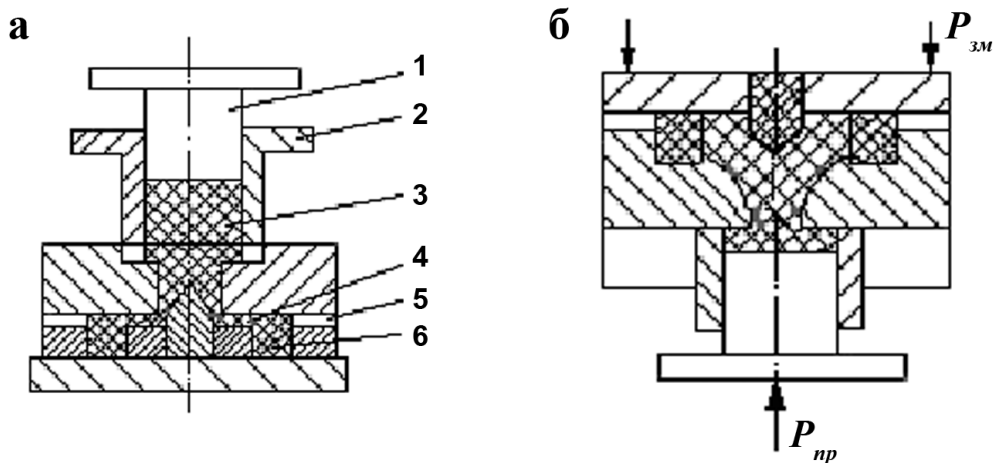


Рис. 5.17. Схеми литтєвих прес-форм:

- 1 – шток (плунжер); 2 – завантажувальна камера (циліндр); 3 – залишковий прес-матеріал;
 4 – ливниковий канал; 5 – повітряний (вентиляційний) канал; 6 – відпресований виріб;
 а) форма з верхньою завантажувальною камерою; б) форма з нижньою камерою

При попаданні розтопу в порожнину (формувальне гніздо) прес-форми відбувається інтенсивне випаровування вологи і виділення летких внаслідок розширення і перепаду тисків (початковий тиск в порожнині форми атмосферний). Волога і леткі разом з повітрям виходять через вентиляційні канали. Це явище значно прискорює процес затвердження

матеріалу. Монолітність виробу досягається підвищенням тиску в формі ($P_{\phi} = 25 \div 60$ МПа), який створюється після того, як матеріал перекриє вентиляційні канали. Тиск, який виникає в завантажувальній камері (P_{np}), встановлюється такий, щоб досягти в камері P_{ϕ} . Це можливе, коли тиск пресування в циліндрі знаходиться в межах $P_{np} = 80 \div 120$ МПа.

У випадку лиття зверху тиск на шток передається з верхнього гідроциліндра преса через верхню плиту. У випадку пресування у формі з нижнім розміщенням завантажувальної камери (б) верхній гідроциліндр служить для змикання прес-форми, а тиск для формування передається з нижнього гідроциліндра преса. Застосування литтєвих прес-форм з нижньою завантажувальною камерою дозволяє максимально механізувати процес пресування або його автоматизувати. Форми для такого способу, як правило, стаціонарного типу.

5.1.2.1. Стадії процесу формування

Технологічний процес виконується аналогічно прямому пресуванню з тими відмінностями, які викликані використанням, в основному, зйомних прес-форм або напівстаціонарних литтєвих блоків із зйомним пакетом форм. Через це процес складається з таких стадій: збирання форми або пакета; встановлення форми чи пакета; завантаження попередньо нагрітого матеріалу; операція пресування за рахунок упорскування розтопу, створення тиску формування; витримка під тиском; відвід штока; зняття прес-форми або пакета з виробом; зняття виробу при розбиранні чи виштовхування на устаткуванні з виштовхувачем. У випадку стаціонарних форм з нижньою завантажувальною камерою відбувається розмикання і виштовхування виробу без розбирання окремих частин форми.

При литтєвому пресуванні відсутня підпресовка завдяки тому, що у порожнину форми матеріал поступає у в'язкопластичному стані, а умови пресування сприяють видаленню летких та вологи.

5.1.2.2. Технологічний режим литтєвого пресування

Режим пресування характеризується такими параметрами: температура пресування; питомий тиск пресування (тиск формування); зусилля пресування; час витримки під тиском; зусилля змикання (запирання) форми, час циклу.

Температура литтєвого пресування. Температурний параметр потрібно розділити на дві складові – температура у завантажувальній камері ($t_{зк}$) і температура у порожнині форми (t_{np}). У завантажувальній камері литтєвої форми встановлюється така температура, яка б забезпечила високу швидкість течії розтопу в ливникових каналах.

Слід пам'ятати, що в результаті течії матеріалу в каналах від втрати тиску спостерігається додатковий розігрів його. Це явище називається дисипацією енергії. Тому температура матеріалу в формувальній порожнині форми вища, ніж в завантажувальній камері. Приріст температури можна розрахувати з виразу:

$$\Delta t = \Sigma \Delta P / c_p \cdot \rho, \quad (5.25)$$

де: $\Sigma \Delta P$ – сумарний перепад тиску в ливникових каналах (втрати тиску при течії каналами форми); c_p – теплоємність матеріалу при t_{np} ; ρ – густина прес-матеріалу при t_{np} .

Внаслідок цього в формі встановлюється температура пресування, яка дорівнює:

$$t_{np} = t_{зк} + \Delta t, \quad (5.26)$$

де: $t_{зк}$ – температура в завантажувальній камері.

Додатковий розігрів слід враховувати, оскільки він може призвести до завчасного затвердження в каналі чи ливниковому циліндрі, крім цього дисипація енергії в'язкої течії може спричинити до деструктивних процесів в матеріалі.

Потрібно зауважити, що температура пресування (t_{np}) при литтєвому пресуванні вища, ніж при компресійному, на величину до 30 °С. Це обумовлене тим, що в порожнину форми

матеріал потрапляє уже розтопленій, гомогенізований з температурою близькою, або ж рівною з температурою пресування. До того ж з об'єму матеріалу видалені леткі та волога, які можуть гальмувати структурування зв'язного.

Питомий тиск і зусилля пресування. Питомий тиск пресування (тиск формування на одиницю площі виробу), як правило, вищий за тиск при компресійному пресуванні і також залежить від природи матеріалу і конструкції виробу. Питомий тиск при литтєвому пресуванні перебуває в межах $25 \div 60$ МПа. Загальне зусилля пресування (тиск пресування), яке створюється в завантажувальній камері, досягає $60 \div 120$ МПа і служить для забезпечення ефективної течії розтопу в ливникових каналах і для створення необхідного тиску пресування в порожнині форми.

Для прес-форми з верхнім упорскуванням зусилля пресування визначається з залежності:

$$N_{зм} = P_{пр} = P_{лит} \cdot F_{зк}, \quad (5.27)$$

де: $F_{зк}$ – площа завантажувальної камери в площині розйому.

В даному випадку $P_{пр}$ служить і зусиллям для запирання прес-форми ($N_{зм}$), яке запобігає розмиканню форми під час пресування. Площа завантажувальної камери має бути хоча б на 10% більшою від площі виробів і ливникових каналів. В загальному для розрахунку $F_{зк}$ використовують залежність у вигляді:

$$F_{зк} = (F_{вир} \cdot n + F_{л}) \cdot 1,25, \quad (5.28)$$

де: $F_{вир}$ і $F_{л}$ – відповідно площа виробу і ливників в площині розйому; n – гніздність форми.

При пресуванні з нижньою завантажувальною камерою тиск пресування створюється нижнім гідроциліндром:

$$P_{пр} = P_{лит} \cdot F_{зм}, \quad (5.29)$$

А зусилля запирання – верхнім гідроциліндром:

$$N_{зм} = P_{лит} \cdot (F_{вир} \cdot n + F_{л} + F_{зк}) \cdot 1,25, \quad (5.30)$$

де: $F_{л}$ – площа ливників.

Тиск формування при литтєвому пресуванні можна розрахувати, виходячи з умови:

$$P_{пр} = P_{пр}^к + \Sigma \Delta P, \quad (5.31)$$

де: $P_{пр}^к$ – тиск при компресійному пресуванні; $\Sigma \Delta P$ – втрата тиску на течію в ливникових каналах, яка, як правило, складає $40 \div 50$ МПа.

Тиск формування також можна розрахувати, використовуючи криві течії (залежність $\tau = f(\bar{\gamma})$). Швидкість зсуву розраховують, виходячи з об'ємних витрат матеріалу при упорскуванні у форму і розмірів ливників.

Об'ємні витрати:

$$V = F_{зк} \cdot v, \quad (5.32)$$

де: v – швидкість руху плити преса або поршня гідроциліндра виштовхувача при упорскуванні.

Безумовно, що питома витрата буде залежати від розмірів ливників. При конструюванні прес-форми визначають діаметр каналу залежно від маси відпресовки (рис. 5.18).

Питомий тиск уточнюють, враховуючи втрати тиску на тертя при течії в каналах:

$$P'_{лит} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot P \cdot 2,3 \lg \left(\frac{D}{d} \right)^2 + \pi \cdot D \cdot L \cdot f \cdot P, \quad (5.33)$$

де: D – діаметр литтєвого штока; d – діаметр ливникових каналів; P – тиск, який забезпечує течію з необхідною швидкістю; L – хід штока; f – коефіцієнт тертя матеріалу об стінки форми.

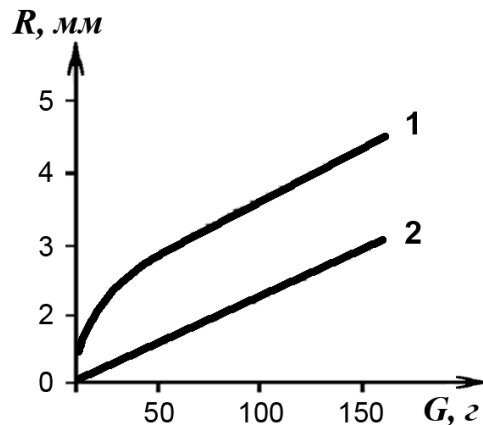


Рис. 5.18. Вплив маси відпресовки на розмір ливників:

1 – розподільчі ливники; 2 – впускні; R – радіус каналу; G – маса відливки

Час витримки під тиском. Слід враховувати, що температура литтєвого пресування вища за температуру компресійного пресування ($T_{пр}^л > T_{пр}^к$), матеріал в порожнину форми надходить у вигляді гомогенного розтопу з $T \cong T_{пр}^л$, крім того, з матеріалу інтенсивно виділяються волога і леткі, внаслідок чого швидкість затвердження при литтєвому пресуванні значно вища, ніж при компресійному, а тому $\tau_{випр}^л$ менший на 60 ÷ 40 % від $\tau_{випр}^к$.

Розрахунок часу витримки базується тільки на врахуванні швидкості затвердження прес-матеріалу від градієнта температури і може бути визначений з залежності:

$$\tau_{випр} = \tau_{затв} = 0,85 \cdot (\tau_{затв}^0 - \tau_n') \cdot \exp[\gamma_1(t_0 - t_\phi + 4)], \quad (5.34)$$

де: $\tau_{затв}^0$ – час затвердження при стандартному пластометричному випробуванні при t_0 ; τ_n – час нагріву матеріалу в пластометрі ($\tau_n \approx 19$ с); γ_1 – температурний коефіцієнт прес-матеріалу (характеризує реакційну здатність).

Розраховані параметри експериментально уточнюються для конкретного виробу.

Переваги литтєвого пресування

В порівнянні з прямим (компресійним) пресуванням при литтєвому забезпечується:

- менший час затвердження, а тому – вища продуктивність процесу;
- вища точність і якість виробів внаслідок повнішого видалення летких і рівномірного затвердження;
- відсутність переливки;
- зменшення браку на жолоблення, оскільки більш рівномірне затвердження в усьому об'ємі, отже, можливо формувати різнотовщинні вироби;
- відсутність зміщення тонкої арматури і знаків;
- формування тонкостінних виробів з великою висотою стінки.

Недоліки литтєвого пресування:

- складна прес-форма, що підвищує її вартість;
- значно вищий тиск пресування, що підвищує енерговитрати;
- більші витрати прес-матеріалу (є залишки затвердженого матеріалу в завантажувальній камері і ливниках);
- ускладнюється зняття виробу при використанні форм з верхньою завантажувальною камерою.

Час нагрівання τ'_n можна розрахувати з залежності конвективного теплообміну:

$$\tau'_n = \frac{\delta^2 \cdot F_0}{4 \cdot a}, \quad (5.35)$$

де: F_0 – критерій Фур'є, який визначається з залежності температурного параметру θ від конфігурації стінки виробу (рис. 5.19), $F_0 = f(\theta)$.

$$\theta = \frac{t_\phi - t_{np}}{t_\phi - t_3}, \quad ^\circ\text{C} \quad (5.36)$$

де: t_ϕ , t_{np} , t_3 – температури відповідно форми, пресування прес-матеріалу при завантаженні; a – коефіцієнт температуропровідності прес-матеріалу, м/с.

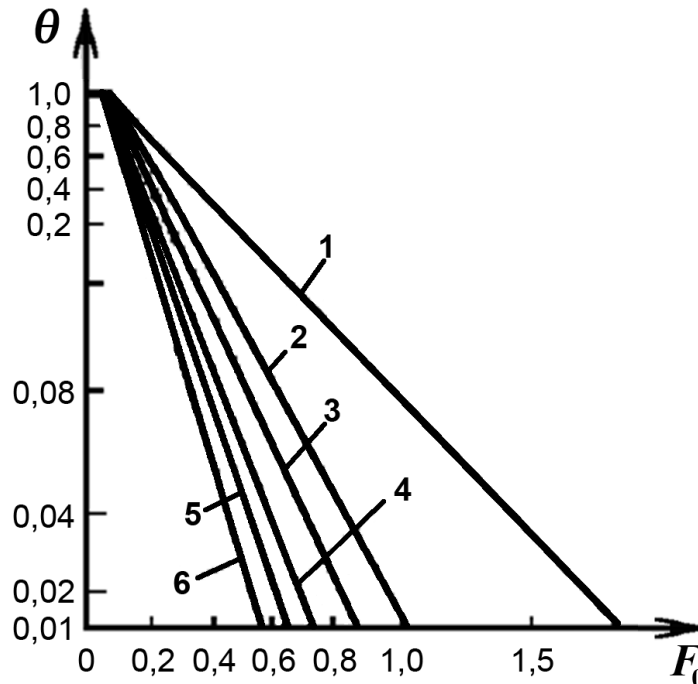


Рис. 5.19. Залежність критерію Фур'є (F_0) від температурного параметру (θ) при конструкції виробу: 1 – пластина; 2 – брусок; 3 – циліндр з $l > d$; 4 – куб; 5 – циліндр з $l \leq d$; 6 – куля

Процес використовують для формування тонкостінних виробів зі значною різновтовщинністю, а також виробів з тонкою прохідною арматурою і прохідними отворами малого діаметра, для формування багатоколірних виробів, а також виробів з відношенням $H/\delta > 2 \div 5$.

Брак при пресуванні, як правило, викликаний порушенням технологічного режиму, конструктивними відхиленнями в оснащенні, прорахунками в конструюванні виробу, відхиленнями технологічних характеристик прес-матеріалу, недбалим веденням процесу (див додаток 4).

5.1.3. Пряме пресування з декоруванням та двоколірне пресування

5.1.3.1. Пресуванням з декоруванням

В багатьох випадках потрібно виготовити виріб з декоративним рисунком на поверхні. Нанесення рисунку трафаретним друком – високохудожній метод. А розфарбування фарбами – трудомісткий процес.

З іншого боку сьогодні питання стають досить актуальними у зв'язку із зростанням об'єму товарів народного споживання та естетичних пакувальних виробів.

Один з методів швидкого декорування полягає у сумісному пресуванні виробів з декоративним шаром. Для декоративного шару використовують папір, або тканину з потрібним рисунком, які попередньо просочені зв'язним, в більшості випадків такої ж природи, що і зв'язне в прес-порошку.

Декоративні вироби виготовляють в основному з сечовино- і меламіно-формальдегідних прес-матеріалів. Отже смола для просочування буде прозора і не затінить рисунок.

Просочування здійснюється на дільниці виготовлення виробів. Просочений матеріал з рисунком сушать при $60 \div 70$ °С. Потім з нього нарізають заготовки за формою, яка відповідає конфігурації виробу. Заготовка вкладається в форму. Після чого завантажують прес-порошок і здійснюють пресування за режимом, властивим для перероблюваного прес-матеріалу і визначеним у відповідності з конфігурацією і габаритами виробу.

В загальному технологічна схема виготовлення декорованих виробів методом пресування за стадіями процесу представлена на рис. 5.20.

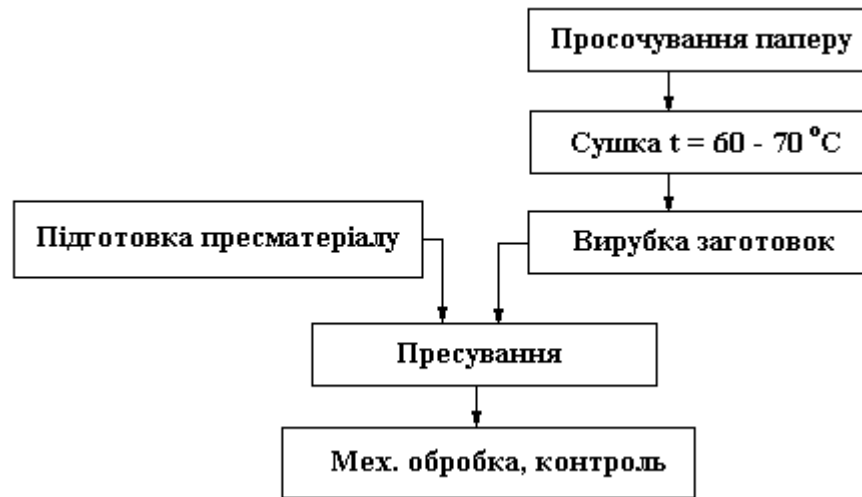


Рис. 5.20. Схематичне зображення технологічного процесу пресування з декоруванням

При пресуванні в залежності від конструкції виробу і оснащення можуть бути окремі випадки, а саме:

1. При пресуванні в прес-формі закритого типу декорують горизонтальні площини виробу при одночасному пресуванні прес-порошку і листової декоративної заготовки.
2. У відкритій або напівзакритій формі проводять декорування верхньої горизонтальної площини. Для цього пресують спочатку прес-порошок, після цього на відформовану заготовку – півфабрикат накладають листову заготовку рисунком доверху і повторно спресовують цей сендвіч. (Такий спосіб здійснюється коли виріб плоский і невисокий).
3. У двогніздних формах з різною висотою пуансонів при великій висоті виробу – здійснюють декорування вертикальних площин виробу.

Для цього спочатку пресують підкладку – виріб з прес-порошку. Відпресований виріб охолоджують, обгортають свіжопросоченим листом і сушать разом при $60 \div 70$ °С. Потім цей сендвіч опускають у другу матрицю і здійснюють повторне пресування – роблять це, як правило, уже в другій зміні.

5.1.3.2. Формування двоколірних виробів

Двоколірні вироби виготовляються, як правило, з сечовино- і мелано-формальдегідних прес-порошків.

Метод полягає у двостадійному пресуванні, що може бути реалізоване двома способами:

1. в прес-формах з парними гніздами;
2. в прес-формах зі змінними пуансонами.

Парні гнізда прес-форми відзначаються різницею розмірів на товщину відпресованого матеріалу одного кольору (рис. 5.21).

Змінні пуансони відзначаються різницею розмірів (висоти) на товщину одного кольору. Співвідношення двох кольорів може бути різним і найбільш часто зустрічається від 1:1 до 1:2.

У першому випадку пресування здійснюють одночасно в обох гніздах прес-форми. У першому гнізді формують одноколірну заготовку, а в другому – відформовують двоколірний виріб за рахунок пресування другого шару на попередньо відформованому шарі у першому гнізді.

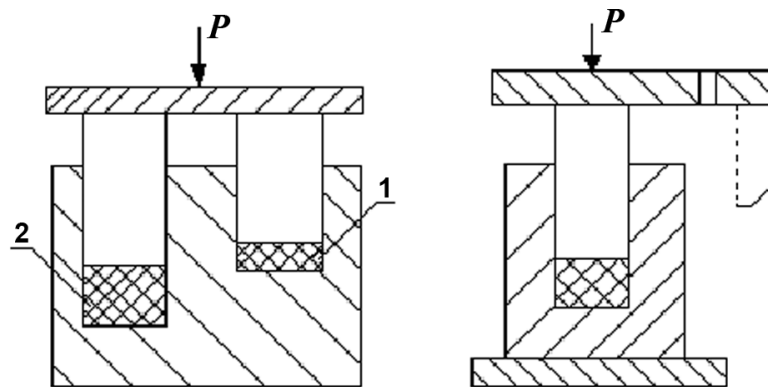


Рис.5.21. Схематичне зображення конструкції прес-форми для двоколірного пресування:
а) з парними гніздами; б) з змінним пуансоном

При змінному пуансоні використовують холодні одноколірні заготовки. Через це для запобігання розтріскування заготовки, а також з метою встановлення потрібного температурного режиму пресування (через погану теплопровідність пластмасового півфабрикату першого шару) заготовку разом з прес-порошком прогривають в прес-формі перед змиканням. Час прогрівання визначається експериментально на основі конвективного теплообміну та теплопровідності.

Найбільш оптимальний варіант пресування з провертанням пуансонів – коли спресовується заготовка, при розйомі форми здійснюється провертання плити пуансонів і встановлюється короткий пуансон. Тут же засипається прес-порошок другого кольору і повторно пресується виріб.

6. ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ РЕАКТОПЛАСТІВ

Лиття під тиском реактопластів використовують тоді, коли є велика тиражність виробництва – завдання на виготовлення великої серії виробів, а також при необхідності формування виробів високої точності розмірів, форми та якості.

Для лиття використовують термореактивний матеріал, який повинен мати добру текучість і необхідний час в'язкотекучого стану, або ж добру здатність до упорскування. Здатність ця залежить від в'язкості розтопу матеріалу, яка для реактопластів, закономірно, буде наростати внаслідок того, що нагрітий до стану топлення матеріал зазнає реакції затвердження (поліконденсації чи полімеризації зв'язного). Тому час перебування у в'язкотекучому стані, протягом якого матеріал здатний до упорскування, є досить короткий і знаходиться в межах $10 \div 100$ с. Час цей залежить від температури та типу прес-матеріалу, наприклад, для фенопластів він є значно довший, ніж для епоксидних прес-матеріалів. Час перебування у в'язкотекучому стані, як правило, визначають методом Канавця (див. розділ 3).

Процес лиття полягає у тому, що доза матеріалу набирається у литтєвому циліндрі під час пластикації при температурі топлення зв'язного, після того упорскується у зімкнуту форму, яка нагріта до температури формування. Температура формування є вищою, ніж температура пластикації. Після упорскування здійснюється витримка на затвердження під тиском у формі, в якій утримується постійно визначена температура формування.

Для лиття використовують литтєві машини звичайної конструкції з певними конструктивними особливостями. Разом з тим на сучасному рівні розвитку є різновидності методу, одним з яких є метод лиття, який використовується на фірмі Драберт (Німеччина) (рис. 6.1).

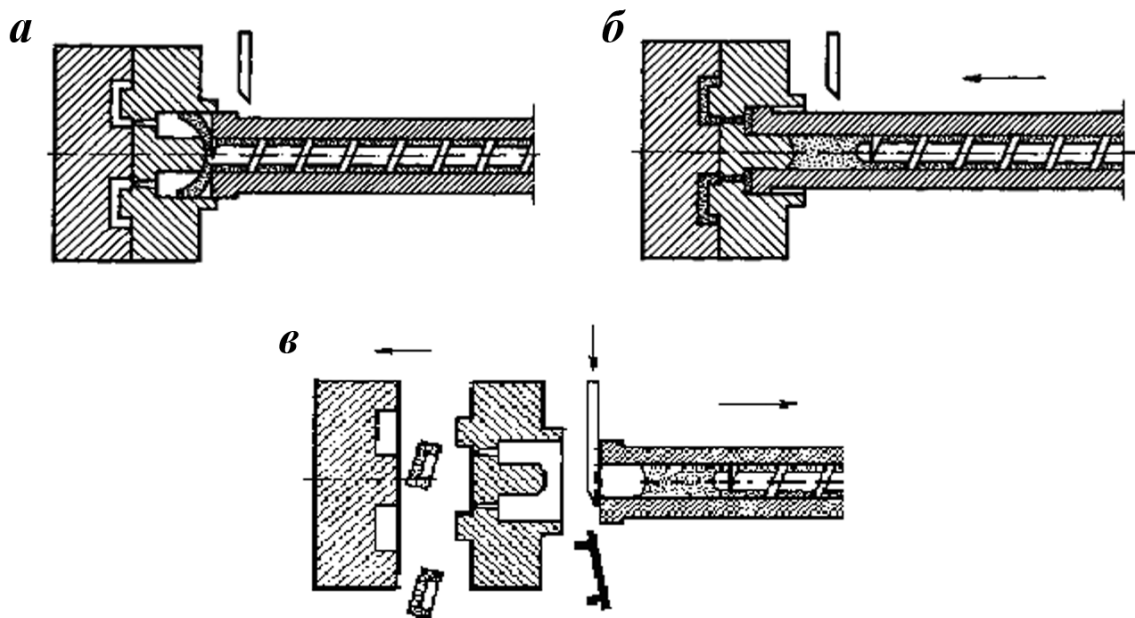


Рис. 6.1. Схема лиття під тиском реактопласту згідно технології фірми Драберт: а) перетискання шнеком прес-матеріалу до завантажувальної камери в формі; б) упорскування за допомогою переміщення матеріального циліндра; в) розмикання форми, виштовхування відливки і відділення ливників (на рис. відсутні нагрівачі)

В цьому методі упорскування здійснюється внаслідок осьового руху циліндра, в якому передня сторона виконує роль циліндричного плунжера. При такому методі суттєво зменшуються технологічні відходи та покращується переробка реактопластів з поганою текучістю.

6.1. Особливості лиття під тиском реактопластів

До особливостей лиття під тиском реактопластів належать:

1. Форма нагріта до температури ефективного затвердження прес-матеріалу (РП) і не охолоджується протягом всього циклу.
2. Точно регульована температура розтопу в інжекційному циліндрі, яка є нижчою, ніж температура формування.
3. Збільшене зусилля обертання шнека при пластикації у зв'язку з підвищеною в'язкістю розтопу. Особливу увагу приділяють текучості матеріалу (значно вища, ніж нижня межа текучості за Рашигом).
4. Тиск підпору (протитиск), або тиск пластикації вводиться для того, щоб покращити гомогенізацію, оскільки низька текучість прес-матеріалу і його гетерогенність, а тому – погано перемішується, а також для встановлення точної температури розігріву (пластикації).

Для переробки РП на відміну від термопластів використовують литтєві машини, які забезпечують підвищений крутний момент на шнекові і підвищений тиск лиття внаслідок високої в'язкості розтопу прес-матеріалу. Час початку і кінця пластикації повинен точно регулюватись, щоб звести до мінімуму реакцію затвердження зв'язного в циліндрі. Для точності підтримки температури (для запобігання перегрівання і, як наслідок, – прискорення реакції зшивання зв'язного) циліндр нагрівається, а шнек охолоджується рідким теплоагентом від індивідуальних термостатів. Крім того, в форму подається теплоагент з значно вищою температурою для підтримання температури пресування.

Лиття під тиском РП має ряд переваг над іншими методами переробки - це короткий цикл формування (в 6 раз менший, ніж при прямому пресуванні); висока якість виробів; можливість повністю автоматизувати процес; економічність при масовому виробництві.

6.2. Основні стадії лиття РП і технологічні параметри

Пластикація. Під час цієї стадії відбувається переведення прес-матеріалу у в'язкотекучий стан, який для запобігання завчасного затвердження повинен мати температуру не вищу, ніж $80 \div 100$ °С. Слід зауважити, що на цій стадії має місце значне саморозігрівання маси від тертя і дисипації енергії в'язкої течії. На саморозігрівання має великий вплив тиск підпору (пластикації) – $P_{\text{під}}$ (рис. 6.2.). Як бачимо, тиск підпору може призвести до значного підвищення температури розтопу, і цей вплив проявляється тим відчутніше, чим вища швидкість обертання шнека. Приріст температури можна обчислити з залежності дисипації енергії при в'язкій течії (див. розділ “пресування” та лиття ТП) і встановити експериментально з залежності $P_{\text{під}}$ від ω . Саме з цього приводу в технологічний режим вводять точне значення $P_{\text{під}}$.

При пластикації важливою є точність набору дози. У випадку більшої дози від маси відливки залишкова кількість буде перегріватись від теплоти реакції затвердження і додатково тверднути. Це може викликати значну зміну текучості аж до повної її втрати, що може викликати закупорку каналів та циліндру. У зв'язку з цим не бажані також довгі паузи між дозуванням і упорскуванням.

Упорскування розтопу. При ньому відбувається додатковий розігрів розтопу через дисипацію енергії в'язкої течії, а також від адіабатичного стискання в ливниках і формі. При цьому температура, яка забезпечує ефективне затвердження, може досягти $160 \div 180$ °С.

При заповненні форми не спостерігається орієнтація макромолекул, а лише орієнтація волокнистого наповнювача, яка майже відсутня при струминному режимі.

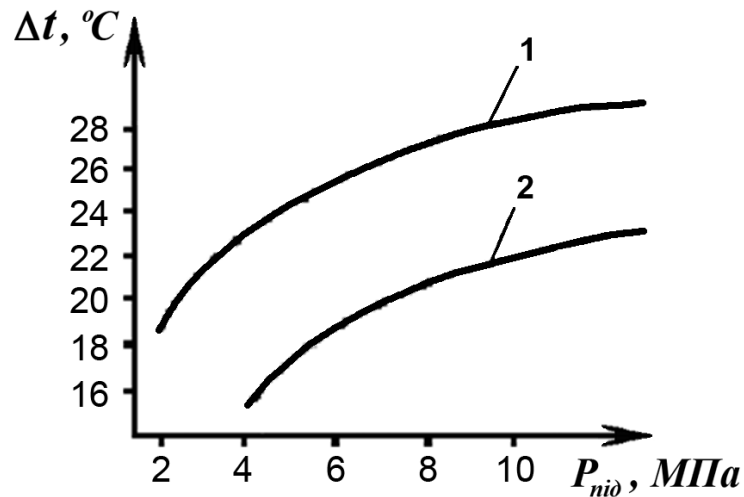


Рис. 6.2. Вплив тиску підпору на приріст температури; кутова швидкість обертання шнека:
1 – $\omega = 0,75$ об/хв; 2 – $\omega = 0,25$ об/хв.

Міцність виробу значно залежить від ущільнення матеріалу, яке досягається тиском у формі, оптимальне значення тиску у формі $P_k = 50 \div 60$ МПа. Оскільки спостерігаються втрати тиску в ливникових каналах тиск в матеріальному циліндрі литвєвої машини повинен бути більшим з урахуванням цих втрат. Отже, тиск лиття буде становити:

$$P_n = P_k + (\Sigma \Delta P_d + \Sigma \Delta P_c), \quad (6.1)$$

де: P_k – тиск у формі рівний тиску компресійного пресування; $\Sigma \Delta P_d$ і $\Sigma \Delta P_c$ – відповідно втрати тиску у ливниках і у соплі. З нормативних документів тиск лиття для амінопластів становить $70 \div 160$ МПа, а для фенопластів – $90 \div 100$ МПа.

Співвідношення температур зон циліндра та фенопласту при проходженні цих зон зображено на рис. 6.3.

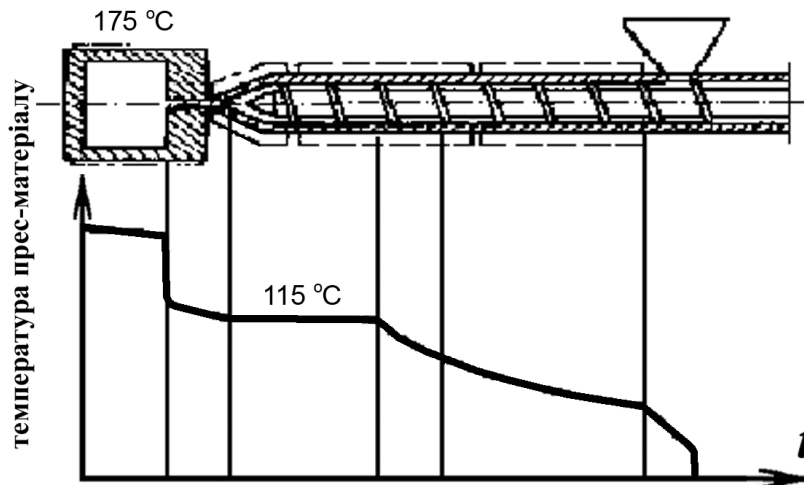


Рис. 6.3. Характерний розподіл температури в циліндрі і в прес-матеріалі

Зміна тиску у формі і температури розтопу під час упорскування приведені на рис. 6.4.

Витримка під тиском здійснюється для компенсації усадки від затвердження матеріалу в формі і проводиться протягом часу, який забезпечує $50 \div 60$ % затвердження зв'язного у впускних ливниках:

$$\tau_{випр} = K_e \cdot (\tau_o - \tau_o') \cdot e^{\beta(T_o - T_e)}, \quad (6.2)$$

де: τ_o – час затвердження прес-матеріалу при стандартному випробуванні; τ_o' – час нагріву до стандартної температури випробування (T_o); T_e – температура матеріалу після

упорскування; β – константа, яка залежить від природи матеріалу; K_e – коефіцієнт, який враховує ступінь затвердження матеріалу у ливнику $\approx 0,5$.

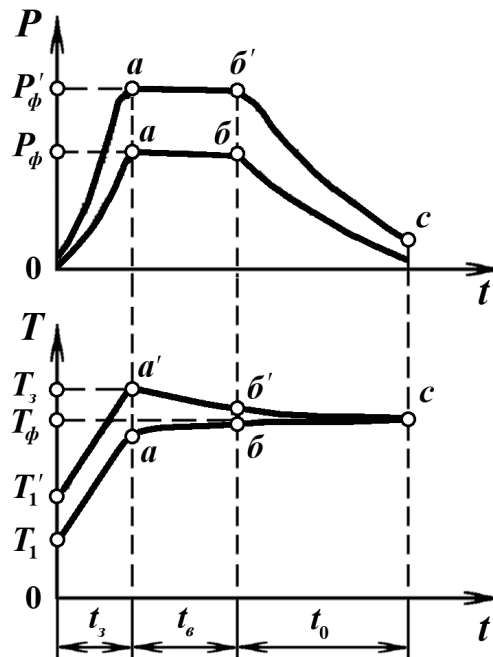


Рис. 6.4. Цикл-діаграма лиття під тиском реактопластів:
 0a – упорск розтопу; ab – витримка під тиском; bc – витримка на затвердження;
 цикл 0 a' b' c – при високій початковій температурі T'_1 і тиску P'_ϕ

Витримка на затвердження. Проводиться для закінчення реакції структурування. Затвердження починається відразу при досягненні матеріалом температури розтопу в інжекційному циліндрі ($T_p + \Delta T$). Тому час витримки на затвердження враховує тільки час на реакцію структурування, без нагріву:

$$\tau_{зтв} = \left[(\tau_0 - \tau'_0) \cdot e^{\beta(T_0 - T_{cp})} \right] - \tau_{випр}, \quad T_{cp} = \frac{T_B + T_\phi}{2}, \quad T_\phi = 150 \div 200^\circ \text{C} \quad , \quad (6.3)$$

де: T_e і T_ϕ – температура виробу і форми відповідно.

У випадку, коли формується зразок великої товщини, то час витримки на затвердження розраховується аналогічно до литтєвого пресування. Зняття виробу здійснюється з гарячої форми при температурі формування, після чого можлива термостабілізація. Міцність виробу залежить як від повноти реакції затвердження прес-матеріалу, так і від тиску у формі (рис. 6.5).

6.2.1. Практична методика встановлення технологічного режиму лиття РП

Температура по зонах встановлюється в вузькому інтервалі з урахуванням зусилля підпору таким чином, щоб на виході вона не перевищувала $130 \div 140^\circ \text{C}$ для фенопластів і $100 \div 120^\circ \text{C}$ для амінопластів. Нижню межу T ($80 \div 100^\circ \text{C}$) встановлюють на 1/3 дози упорскування. Потім встановлюють оберти шнека і тиск підпору, а також швидкість упорскування.

Якість розтопу оцінюють візуально: з сопла повинен виходити рівномірний, гладкий, блискучий пруток без вкраплювань твердих частин матеріалу. Матеріал при виході не повинен газувати. Консистенція розтопу має відповідати консистенції розм'якшеного пластиліну.

Температуру форми встановлюють, починаючи з верхньої межі.

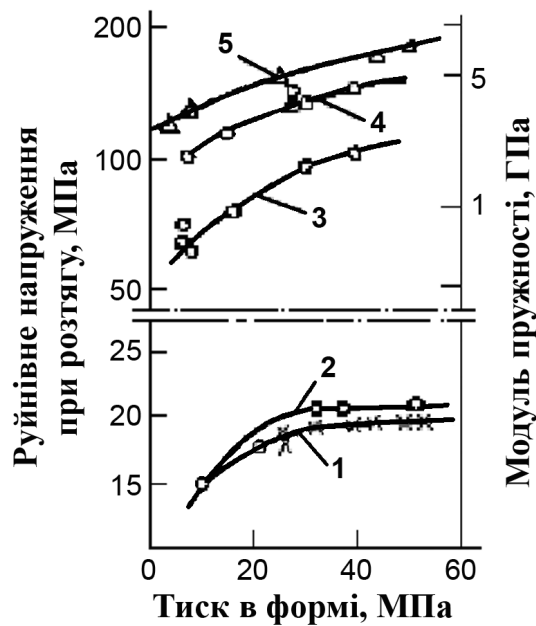


Рис. 6.5. Вплив тиску у формі на міцність виробів:

- 1, 2 – напруження руйнування при розтязі для ФКПМ - 15Т з діаметром ливника 2 і 5 мм, відповідно;
 3 – напруження руйнування при розтязі для АГ-4В з діаметром ливника 5 мм;
 4 і 5 – модуль пружності для К - 18 - 2 з діаметром ливника 5 і 2 мм, відповідно

6.3. Види браку при литті під тиском реактопластів

Недоливка: мала доза матеріалу, низька текучість, низька температура розтопу, малий тиск упорскування, недостатня швидкість упорскування, недостатня вентиляція форми.

Здуття: низька температура форми, великий вміст вологи і летких, нерівномірний нагрів формувальної порожнини (місцевий перегрів).

Матовість поверхні: надто висока температура розтопу (при пластикації розділення маси), тривалий час пластикації, вологий матеріал, зношена поверхня форми.

Брак за розміром: недостатній тиск упорскування, малий час витримки під тиском, висока температура розтопу.

Інші відхилення при литті аналогічні до браку при пресуванні реактопластів.

7. ТЕХНОЛОГІЯ ПЕРЕРОБКИ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Розвиток сучасної техніки викликав гостру потребу в конструкційних матеріалах, що характеризуються високою міцністю, надійністю, жаростійкістю, низькою густиною тощо. Ці конструкційні матеріали, які використовуються в різних галузях народного господарства, можна розділити на дві групи: 1) особливо чисті, бездефектні (гомогенні) матеріали і 2) композиційні (гетерогенні) матеріали. Композиційні матеріали – матеріальні системи, що складаються із суміші чи комбінації двох, чи більше макрокомпонентів, які розрізняють за формою чи складом і які суттєво не розчинні одна в одній.

Полімерні композиційні матеріали (композити) складаються із неперервної полімерної матриці, в якій рівномірно розподілена дискретна чи неперервна фаза наповнювача. Полімерна матриця створює міцний зв'язок між окремим елементами наповнювача і забезпечує композиту монолітність і здатність до переробки. Через поверхню розподілу фаз полімерна матриця передає механічні навантаження на частинки наповнювача і створює умови для одночасної їх роботи, приводить до зростання механічних властивостей композитів в порівнянні з неперервним матеріалом. Наповнювач надає композиту міцності, жорсткості, теплостійкості та інших цінних якостей. Таким чином, в композитах при певних умовах реалізується такі властивості, яких не мав жоден із компонентів окремо.

Зараз найбільший об'єм виробництва серед полімерних композитів (до 90 %) припадає на склопластики – полімери, армовані скляними волокнами. Приблизно 9 % припадає на полімерні композити, армовані вуглецевими і арамідними волокнами (вугле- і органопластики), і 1 % – на композити, армовані неорганічними (борними, керамічними, кварцевими тощо), а також спеціальними полімерними (поліетиленовими, полібензімідазольними тощо) волокнами. Серед полімерних матриць 76 % об'єму припадає на термореактивні (ненасичені поліестерні, епоксидні, фенольні). Серед термопластичних матриць переважають поліаміди, поліпропілен, термопластичні поліестери, полісульфон.

Полімерні композиційні матеріали створюють цілеспрямовано для виконання певних функцій у вигляді деталей і вузлів машин і механізмів. Тому технологія створення і переробки композитів тісно пов'язана з проектуванням виробів із них.

Властивості полімерних композиційних матеріалів залежать від багатьох факторів: хімічної природи наповнювача та полімерної матриці, геометричної форми наповнювача та схеми армування, поверхневих явищ на межі розподілу фаз, технологічних параметрів формування виробів із них.

Регулювання вищевказаних параметрів композитів значно розширює межі їх застосування.

Зараз потреби народного господарства в окремих полімерах задовольняються на 30 ÷ 60 %. Нестачу полімерів можна зменшити за рахунок інтенсифікації їх виробництва, правильного підбору пластмас для виготовлення виробів, підвищення їх довговічності, повною переробкою відходів полімерних матеріалів і, нарешті, виготовленням полімерних композиційних (наповнених і армованих) матеріалів.

Одержання композиційних полімерних матеріалів дає ряд переваг:

1. досягається економія полімерної сировини;
2. покращуються експлуатаційні характеристики і зовнішній вигляд готових виробів;
3. розширюється сировинна база галузі промисловості переробки пластмас;
4. можлива утилізація відходів різних галузей промисловості, що зменшує забрудненість навколишнього середовища, а також знижує вартість композитів.

7.1. Основи створення полімерних композиційних матеріалів

Як вже вказувалося вище, полімерні композиційні матеріали складаються із неперервної матриці, в якій більш-менш рівномірно розподілені дискретні чи неперервні мікрооб'єми наповнювача.

7.1.1. Класифікація полімерних композиційних матеріалів

За геометричною формою наповнювача полімерні композиційні матеріали поділяють на дві групи: 1) із зернистим наповнювачем і 2) із волокнистим наповнювачем.

Зернисті наповнювачі мають близькі розміри довжини (l) і діаметру (d): ($l/d \approx 1$). У волокнистих наповнювачів їх довжина значно переважає діаметр: $l/d \gg 1$.

Схема структури полімерних композиційних матеріалів подана на рис. 7.1.

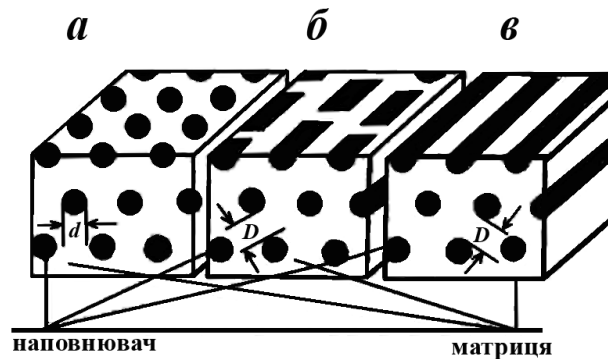


Рис. 7.1. Схема структури полімерних композиційних матеріалів:
а) зернистий наповнювач; б) дискретний волокнистий наповнювач;
в) неперервний волокнистий наповнювач

Зернисті наповнювачі розподіляють на дисперсні, що мають розмір зерен $d \leq 0,1$ мкм, а також на порошкові, що мають більше 25 % з розміром зерен $d \geq 1$ мкм. Частіше використовують порошкові наповнювачі з розміром частинок $1 \div 15$ мкм. Збільшення розміру частинок і їх густини призводить до розвитку процесу седиментації при переробці.

При використанні зернистого наповнювача в композиті його роль зводиться до механічної перешкоди на шляху розповсюдження тріщин руйнування в процесі деформації, яка виникає в матриці під дією прикладеного навантаження. Зерна наповнювача зміцнюють матрицю шляхом механічного стиснення (деформації). Ступінь наповнення зернистими наповнювачами термопластів – $10 \div 40$ %, реактопластів – $60 \div 70$ %. При виготовленні полімер - керамічних матеріалів ступінь наповнення досягає $90 \div 95$ %.

Полімерні композитні матеріали з волокнистим наповнювачем називаються армованими пластиками. Армуючі волокна забезпечують композитам високу міцність, жорсткість, тривкість форми, підвищують їх теплостійкість, а також надають їм інші цінні властивості. На рис. 7.2 подані схеми армування полімерів неперервними волокнами.

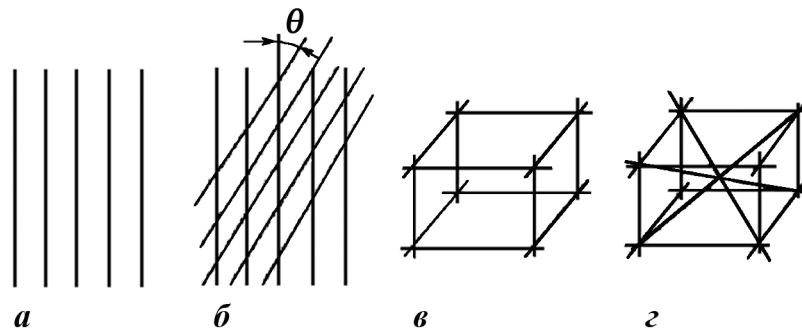


Рис. 7.2. Схема армування полімерів неперервними волокнами:
а) одновимірне укладання; б) двовимірне укладання; в, г) об'ємне укладання

Полімерні композиційні матеріали з волокнистим наповнювачем за механізмом армуючої дії наповнювача поділяються на композити з дискретними волокнами і композити з неперервними волокнами. В композитах з дискретними волокнами відношення l/d волокон знаходиться в межах $10^1 \div 10^3$, а в композитах з неперервними волокнами $l/d \rightarrow \infty$.

Дискретні волокна розміщуються в матриці хаотично, утворюючи квазіізотропну структуру: анізотропну в мікрооб'ємі, розміри якого подібні з розмірами волокон, але ізотропну в макрооб'ємі деталі. Анізотропні композити з використанням дискретних волокнистих наповнювачів можна одержати, використовуючи спеціальні технологічні методи, наприклад, накладанням електричного поля в момент формування волокнистого каркасу.

Неперервні волокна можуть бути використані як наповнювачі у вигляді волокон і тканин.

Одновимірне укладання волокон забезпечує максимальну реалізацію їх механічних властивостей в композитах.

Двовимірне укладання волокон здійснюється шляхом послідовного накладання шарів однонаправлених волокон під кутом θ до напрямку волокон попереднього шару. Встановлено, що композити з двовимірними укладанням однонаправлених шарів будуть мати ізотропні властивості в площині листа при $\theta \leq 72^\circ$ і кількості шарів $n \geq 3$.

Недоліками полімерних композиційних матеріалів з одно- і двовимірним армуванням є слабкий опір до міжшарового зсуву і поперечного відриву. Цих недоліків немає у композитів з об'ємним армуванням.

Для об'ємного укладання волокон найбільш часто використовують схему, за якою осі армування співпадають з напрямком осей прямокутної системи координат (рис. 7.2, в). Для виготовлення деталей відповідального призначення використовують схеми армування 4 і 7. За схемою 4 осі армування з орієнтовані за діагоналями кубічної комірки об'ємної структури композиту (рис. 7.2, г). Для одержання квазіізотропної об'ємної структури найбільш бажане армування за схемою 7d, коли в одній структурній комірці армування відбувається вздовж ребер (рис. 7.2, в) і діагоналей (рис. 7.2, г) куба.

Для підвищення міжшарової міцності при зсуві двовимірно-армованих композитів неперервні волокна використовують разом з дискретними волокнами, які рівномірно розподіляють в матриці. Іноді на поверхні неперервних волокон для цієї ж мети вирощують ниткоподібні кристали. Цей процес називають віскеризацією волокон.

Наповнювач у вигляді тканини підвищує міцність композиту (шаруватого пластику) в площі армування за рахунок міцності механічного зчеплення волокон в тканині. В тканинах частіше міцність по основі вища, ніж по утоку. Тому для забезпечення ізотропності полімерних композиційних матеріалів в площині армування при укладенні послідовних шарів наповнювача чергують напрямки тканин по основі і утоку. Недоліком двовимірного

армування є низький опір міжшаровому зсуву і поперечному відриву. До шаруватих композитів відносять також деревинношаруваті, паперовошаруваті (гетинакс) пластики та текстоліти (наприклад, склотекстоліт).

Полімерні композиційні матеріали з наповнювачем із одношарової тканини об'ємного плетіння мають майже ізотропні властивості. Використання багатошарового наповнювача різко знижує міжшарову міцність матеріалу до рівня міцності композитів з двовимірним наповнювачем.

За хімічною природою полімерної матриці полімерні композиційні матеріали поділяються на дві групи: 1) композити на основі термореактивних зв'язних (поліефірних, епоксидних, феноло-формальдегідних, фуранових тощо) і 2) композити на основі термопластичних зв'язних (поліамідів, поліолефінів, поліестерів тощо). Термореактивні зв'язні в процесі переробки композитів (затвердження) переходять в неплавкий і нерозчинний стан, що робить неможливим вторинну переробку відходів.

Термопластичні зв'язні після переробки (формування із композитів виробів) практично не змінюють своєї хімічної структури. Це дозволяє проводити повністю вторинну переробку відходів полімерних композиційних матеріалів на основі термопластів без суттєвого зниження властивостей виробів.

7.2. Поверхневі явища на межі розподілу фаз в композитах

Властивості полімерних композиційних матеріалів залежать від хімічної природи наповнювача, його геометричної форми і розмірів, від схеми армування і ступеню наповнення композиту. Хімічна природа і структура полімерної матриці (гнучкість полімерного ланцюга, регулярність його будови, ступінь кристалічності, густина полімерної сітки) та технологія наповнення і формування виробів також визначають властивості композитів. Підвищення механічних і теплофізичних властивостей полімерних композиційних матеріалів досягається лише в тому випадку, коли забезпечується одночасна робота обох компонентів композиту в процесі його експлуатації. А це, в свою чергу, відбувається тоді, коли існує міцна взаємодія на межі розподілу фаз. Таким чином, властивості композитів також визначаються фізико-хімічними процесами на межі розподілу фаз полімерна матриця – наповнювач.

При введенні наповнювача в полімерну матрицю змінюється конформаційна рухомість полімерного ланцюга за рахунок взаємодії полімеру і наповнювача та стеричних затруднень. Зменшення релаксаційної рухомості полімерного ланцюга призводить до зміни температури склування і температури текучості полімеру. Як правило, підвищуються середні часи релаксації і тим більше, чим вища ступінь наповнення і менший розмір частинок наповнювача. Зміна гнучкості полімерного ланцюга призводить до зміни умов кристалізації кристалічних полімерів та зміни густини пакування макромолекул на поверхні наповнювача в аморфних полімерах.

Таким чином, наповнений полімер можна розглядати як трифазну систему, яка складається із наповнювача, полімерної матриці і граничного шару, властивості якого відмінні від властивостей полімерної матриці. При певному ступені наповнення весь об'єм полімеру може переходити в стан граничного шару. Як вже вказувалось, цей граничний шар полімеру вносить значний вклад у формування фізико-механічних характеристик полімерних композиційних матеріалів.

При наповненні термореактивних полімерів змінюється швидкість реакції їх затвердження за рахунок вибіркової адсорбції компонентів на поверхні наповнювача, а також завдяки участі функціональних груп наповнювача в хімічних реакціях. Це призводить до

підвищення мікрогетерогенності системи і нерівномірності тривимірної сітки, а отже, до підвищення залишкових напружень в наповнених полімерах у порівнянні з ненаповненими.

Частинки наповнювача можуть утворювати також сітку в полімерній матриці за рахунок взаємодії частинок наповнювача між собою чи завдяки злиттю адсорбційних шарів полімеру. Сітка утворюється частіше при зростанні кількості частинок наповнювача в полімері і збільшенні їх анізотропії.

Структурна і фізична неоднорідність може призвести до того, що механічні і інші властивості полімерного композиційного матеріалу можуть бути нижчими у порівнянні з ненаповненим полімером. При одержанні полімерних композиційних матеріалів на межі розподілу фаз “полімер-наповнювач” протікають фізико-хімічні явища, які визначають властивості композитів, як-то: змочування, адсорбція, адгезія, каталіз і ін.

Гарне змочування поверхні наповнювача є необхідною умовою одержання бездефектного композиту. Змочування – поверхневе явище, що полягає у взаємодії рідини (зв’язного) з твердим тілом (наповнювачем) чи іншим рідким тілом при одночасному контакті трьох фаз, що не змішуються, одна з яких є газом (повітрям). Ступінь змочування кількісно характеризується безрозмірною величиною косинуса крайового кута (кута змочування), чи просто крайовим кутом (кутом змочування).

Крайовим кутом (кутом змочування) називають кут, що утворюється дотичними до міжфазових поверхонь, які обмежують змочуючу рідину, і має вершину на лінії розподілу трьох фаз (рис. 6.3).

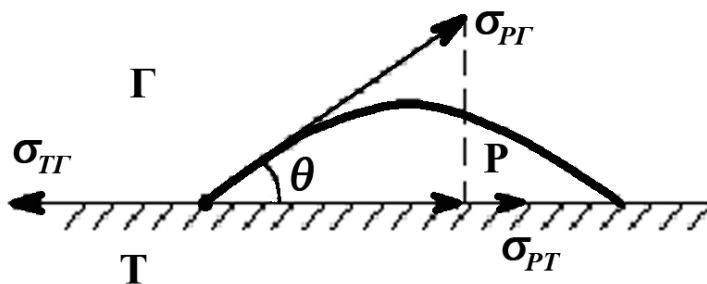


Рис. 7.3. Форма краплі рідини на твердій поверхні:
Г – газ (повітря); Р – рідина (розтон); Т – тверде тіло

Поверхнева енергія твердого тіла, намагаючись зменшитися, розтягує краплю по поверхні. Вона дорівнює поверхневому натягу твердого тіла на межі з повітрям (σ_{TG}).

Міжфазна енергія на межі твердого тіла з рідиною σ_{PT} намагається стиснути краплю, тобто поверхнева енергія зменшується за рахунок зниження площі поверхні. Розтіканню краплі перешкоджають когезійні сили, що діють в ній. Дія когезійних сил направлена від межі між твердою, рідкою і газоподібною фазами по дотичній до сферичної поверхні краплі і дорівнює σ_{PG} . Всі складові поверхневої енергії на рис. 7.3 показані за допомогою векторів сил. Стан механічної рівноваги краплі на поверхні визначається співвідношенням, що називається законом Юнга:

$$\sigma_{TG} = \sigma_{PT} + \sigma_{PG} \cdot \cos \theta, \quad (7.1)$$

З цього співвідношення через поверхневі міжфазні натяги можна знайти таку кількісну характеристику змочування, як косинус крайового кута:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{TG} - \sigma_{PT}}{\sigma_{PG}}, \quad (7.2)$$

Чим менший кут θ і відповідно більший $\cos \theta$, тим краще змочування. При гострому куті θ , тобто коли $\cos \theta > 0$, поверхня наповнювача добре змочується полімерним зв’язним. Якщо ж кут θ тупий, тобто $\cos \theta < 0$, то поверхня наповнювача погано змочується (не

змочується) полімерним зв'язним. Таким чином, межею між змочуванням і незмочуванням є кут $\theta = 90^\circ$ ($\cos\theta = 0$).

Всі тверді тіла умовно розподіляються на дві групи, що розрізняються здатністю змочуватися: 1) з високою і 2) з низькою поверхневою енергією. До першої групи наповнювачів можна віднести, наприклад, металічні, скляні, кварцові волокна, а до другої – синтетичні і штучні волокна.

Щоб відбулось змочування наповнювача полімерним зв'язним, необхідно виконання такої нерівності:

$$\sigma_{TG} \geq \sigma_{PG} + \sigma_{PT}, \quad (7.3)$$

Поверхні з високою поверхневою енергією змочуються повністю майже всіма чистими рідинами, а поверхні з низькою енергією повністю не змочуються. Поверхні з високою поверхневою енергією, що здатні добре змочуватися, як правило, легко адсорбують різні органічні сполуки, що призводить до утворення моношарів органічних речовин з низькою поверхневою енергією. Такі наповнювачі поведуть себе вже як тіла з низькою поверхневою енергією. Вони погано змочуються зв'язним, що призводить до зниження характеристик композитів.

Умову змочування зв'язними реальних твердих тіл (наповнювачів) з урахуванням забруднення їх поверхні адсорбованою вологою, органічними речовинами тощо (фактора забруднення поверхні π) записують нерівністю:

$$\sigma_{TG} \geq \sigma_{PG} \cdot \cos\theta + \sigma_{PT} + \pi, \quad (7.4)$$

Отже, для покращення змочування необхідно зниження поверхневого натягу зв'язного (це досягається введенням в зв'язне поверхнево-активних речовин), очищення зв'язного від домішок (залишків каталізаторів, пластифікаторів, мономерів), що, витісняючись на межу розподілу фаз, можуть утворювати слабкі граничні шари. Необхідно також очищати поверхню наповнювача (для зменшення фактора π), проводити його активацію для підвищення поверхневої енергії.

В реальних системах також необхідно враховувати залежність величини поверхневого натягу зв'язного від молекулярної маси і полідисперсності. Більш низькомолекулярні фракції мають менший поверхневий натяг, тому в композиті можливе розділення на фракції в поверхневому шарі і в об'ємі зв'язного. На наповнювачах з високою поверхневою енергією спостерігається переважно адсорбція фракцій зв'язного з високою молекулярною масою. При цьому полімерна матриця збіднюється на фракції з високою молекулярною масою. У випадку використання наповнювачів з низькою поверхневою енергією все відбувається навпаки. Ці явища глибоко вивчені українськими вченими (Ю.С. Ліпатовим, Ф.Г. Фабуляком та їх співробітниками). Складнішими є випадки введення наповнювача в двокомпонентне зв'язне, коли протікають складні процеси перерозподілу фракцій у об'ємі і на межі розподілу фаз.

Шорсткість поверхні наповнювача змінює рівноважний кут змочування. Шорсткість характеризує мікрорельєф поверхні твердого тіла, тобто наявність виступів і впадин на поверхні. Кількісно шорсткість можна охарактеризувати коефіцієнтом шорсткості (K).

Коефіцієнт шорсткості – відношення фактичної площі поверхні (з урахуванням площі виступів і впадин) до площі її проекції на горизонтальну площину. Він завжди більший одиниці.

Косинус крайового кута змочування шорсткої поверхні реального наповнювача ($\cos\theta_u$) більший, ніж косинус рівноважного кута змочування. Його можна обчислити за формулою Дерягіна-Венцеля:

$$\cos\theta_u = K \cdot \cos\theta, \quad (7.5)$$

де: K – коефіцієнт шорсткості.

Згідно рівняння (6.5) у випадку ліофільної поверхні наповнювача ($\cos\theta > 0$) збільшення шорсткості наповнювача призводить до зростання $\cos\theta_w$, тобто до покращення змочування. Якщо ж поверхня наповнювача ліофобна ($\cos\theta < 0$), то шорсткість, збільшуючи від'ємну величину $\cos\theta_w$, збільшує кут змочування, тобто погіршує змочування.

В гетерогенних системах, до яких належать композити, розрізняють внутрішні міжмолекулярні взаємодії та міжмолекулярні взаємодії між фазами. Внутрішні притягання атомів і молекул окремої фази називають когезію. Вона визначає існування речовин у конденсованому стані і обумовлена міжмолекулярними і міжатомними взаємодіями різної природи. Когезійні сили іноді називають силами атракції (притягання).

Робота когезії визначається витратою енергії на оборотний розрив тіла по перетину, що дорівнює одиниці площі. Так як при розриві утворюється поверхня в дві одиниці площі, то термодинамічну роботу когезії можна виразити так:

$$W_k = 2 \cdot \sigma, \quad (7.6)$$

де: σ – поверхневий натяг тіла на межі з повітрям.

Взаємодію між приведеними в контакт поверхнями конденсованих тіл різної природи (міжфазну взаємодію) називають адгезією (прилипанням). Адгезія забезпечується дією фізичних чи хімічних міжмолекулярних сил на межі розподілу фаз.

Адгезія - це результат намагання системи до зменшення поверхневої енергії. Міцність адгезійного зв'язку характеризується роботою адгезії W_a . Робота адгезії – робота оборотного розриву адгезійного зв'язку, що віднесена до одиниці площі.

Щоб одержати співвідношення, між роботою адгезії і поверхневими натягами компонентів, які взаємодіють між собою, уявимо собі дві конденсовані фази 2 і 3, що мають поверхню на межі з повітрям 1, яка дорівнює одиниці площі (рис. 7.4). Це можуть бути, наприклад, полімерне зв'язне і наповнювач.

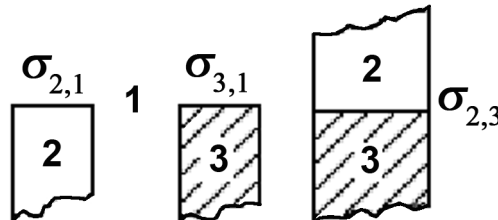


Рис. 7.4. До виведення співвідношення між роботою адгезії та поверхневими натягами компонентів, які взаємодіють:

1 – газ (повітря); 2 – рідина (зв'язне); 3 – тверде тіло (наповнювач)

При нанесенні зв'язного на наповнювач відбудеться явище адгезії і з'явиться міжфазний натяг, що дорівнює $\sigma_{2,3}$. Тоді робота оборотного розриву адгезійного зв'язку визначиться із рівняння Дюпре:

$$W_a = \sigma_{2,1} + \sigma_{3,1} - \sigma_{2,3}, \quad (7.7)$$

З рівняння Дюпре виходить, що робота адгезії тим більша, чим більший поверхневий натяг вихідних компонентів і чим менший кінцевий міжфазний натяг. Рівняння Дюпре майже не використовується для розрахунку роботи адгезії тому, що важко визначити поверхневий натяг твердих тіл на межі з газом (повітрям). Комбінація рівняння Дюпре (7.7) і закону Юнга (7.1) дає можливість непрямого розрахунку термодинамічної роботи адгезії через поверхневий натяг рідини (зв'язного) і рівноважний крайовий кут змочування рідиною твердого тіла:

$$W_a = \sigma_{pr} \cdot (1 + \cos\theta), \quad (7.8)$$

$$\text{або } W_a / \sigma_{pr} = 1 + \cos\theta, \quad (7.9)$$

Рівняння (7.8) чи (7.9) називають рівнянням Дюпре-Юнга. Ним легко користуватися, так як поверхневий натяг рідини і крайовий кут можна відносно легко визначити експериментально. Розділивши обидві частини рівняння (7.9) на 2, одержимо відношення роботи адгезії до роботи когезії для змочуючої рідини:

$$W_a / W_k = 1 + \cos \theta / 2, \quad (7.10)$$

З рівняння (7.10) виходить, що для збільшення змочування необхідно збільшити роботу адгезії чи зменшити роботу когезії (поверхневий натяг) рідини (зв'язного), наприклад, введенням поверхнево-активних речовин, зміною температури. Термодинамічно висока адгезія визначає хороше змочування зв'язним наповнювача. Краще змочує наповнювач та рідина, яка має менший поверхневий натяг чи роботу когезії.

Від роботи адгезії необхідно розрізняти адгезійну міцність W_n . Адгезійна міцність – напруження, яке необхідно прикласти до композиційного матеріалу, щоб викликати розділення компонентів по межі розподілу фаз.

Адгезійну міцність можна визначити:

1. одночасним відривом однієї частини адгезійного сполучення від другої щодо всієї площі контакту;
2. поступовим розшаруванням адгезійного сполучення.

В адгезійну міцність входить як робота розриву міжмолекулярних зв'язків (робота адгезії W_a), так і робота, що витрачається на деформацію компонентів адгезійного сполучення (робота деформації $W_{деф}$):

$$W_n = W_a + W_{деф}, \quad (7.11)$$

Чим міцніше адгезійне сполучення, тим більше будуть деформуватися компоненти системи до моменту її руйнування. Робота деформації іноді може перевищувати роботу адгезії в декілька разів. З ростом швидкості прикладання навантаження на систему роль деформації зростає. Крім того, адгезійна міцність залежить від дефектності зразків, способів їх виготовлення, величини напружень на межі розподілу фаз. Таким чином, термодинамічна робота адгезії, якщо вона вірно визначена, є єдиним показником, що характеризує адгезію двох тіл і має фізичний смисл, незалежно від умов випробувань чи формування адгезійного сполучення.

При руйнуванні адгезійних сполучень можливі такі типи відриву:

1. адгезійний, при якому відбувається повне відшарування адгезиву (полімерної матриці) від субстрату (наповнювача);
2. когезійний, при якому руйнування сполучення іде або по адгезиву, або по субстрату;
3. змішаний, що відповідає частковому руйнуванню адгезійного сполучення одночасно і по адгезиву, і по субстрату.

Тільки перший випадок характеризує адгезію, але він спостерігається найбільш рідко. Для доказу типу руйнування адгезійних сполучень використовують структурні методи дослідження поверхонь після розшарування.

Який же механізм формування адгезійного сполучення? Формування проходить в декілька стадій: розтікання адгезиву по поверхні твердого тіла і його змочування; рівноважне встановлення адгезійного контакту, що пов'язане з макромолекулярними властивостями адгезиву і залежить від процесів адсорбції і дифузії; формування хімічної і фізичної структури адгезиву при затвердженні, що супроводжується виникненням поверхневого шару, властивості якого відмінні від властивостей полімеру в об'ємі. На цій стадії відбувається скорочення (контракція) адгезиву, кристалізація, виділення нових фаз тощо.

Формування поверхні контакту залежить від реологічних властивостей адгезиву, процесів адсорбції і дифузії, умов формування адгезійного сполучення (температури, тиску, часу контакту). Відповідальні за адгезію сили міжмолекулярної взаємодії з'являються в

умовах досягнення молекулярного контакту на межі розподілу фаз. Цей процес залежить від фізичного рельєфу поверхні субстрату (наповнювача). Як уже вказувалось вище, шорсткість поверхні впливає на змочування, а отже і на формування адгезійного сполучення. Щоб збільшити адгезійну взаємодію, необхідно збільшити фактичну площу контакту між полімером і наповнювачем. Це досягається збільшенням ступеня диспергування наповнювача. Важливу роль для підвищення адгезії відіграє також чистота його поверхні.

Зі збільшенням температури формування адгезійного сполучення знижується в'язкість зв'язного, покращуються умови змочування, збільшується площа фактичного контакту, що призводить до зростання адгезійної міцності.

Збільшення часу контакту приводить спочатку до зростання адгезійної міцності, а потім вона залишається практично незмінною.

Залежність адгезійної міцності від тиску має складний характер. Зростання тиску спочатку супроводжується збільшенням числа адгезійних контактів і адгезійна міцність також зростає. Але потім механічне склування, що виникає в полімерах при великому тиску, сповільнює реологічні процеси в адгезійному сполученні. Це призводить до того, що залежність адгезійної міцності від тиску при контакті носить екстремальний характер.

Параметри адгезійного сполучення з параметрами руйнування при визначенні адгезійної міцності зв'язав формулою В.Є.Гуль:

$$W_p = \frac{P \cdot \tau_k \cdot e^{\alpha \cdot P}}{\eta \cdot e^{\frac{U}{R \cdot T_k}}} \cdot K \cdot v \cdot e^{\frac{U_1}{R \cdot T_p}}, \quad (7.12)$$

де: W_p – адгезійна міцність при розшаруванні; P – тиск при контакті; τ_k – час контакту; η – початкова в'язкість адгезиву; U – енергія активації в'язкої течії; T_k – температура контакту; α і K – константи; v – швидкість руйнування адгезійного сполучення; U_1 – енергія активації руйнування адгезійного сполучення; T_p – температура руйнування адгезійного сполучення.

Як вже вказувалось раніше, руйнування адгезійного сполучення строго по межі розподілу фаз відбувається дуже рідко. Розрив відбувається на певній відстані від неї, і напруження, що необхідне для руйнування, не дає відомостей про справжню адгезію між полімером і наповнювачем.

Кожне адгезійне сполучення Я.О.Бікерман розглядає таким, що складається із декількох компонентів: субстрату, граничного шару, адгезиву, другого граничного шару, другого субстрату. Таким чином, структура адгезиву неоднорідна перпендикулярно до поверхні підкладки. Згідно точки зору Я.О.Бікермана, руйнування адгезійного сполучення відбувається по слабкому граничному шару, де виникають мікротріщини. Експериментатору необхідно встановити, з яким слабким граничним шаром він має справу і як можна запобігти утворенню цього шару. Академік Ю.С.Ліпатов вважає, що викладені ним структурні і термодинамічні підходи є теоретичним обґрунтуванням концепції слабких граничних шарів.

Які ж шляхи підвищення адгезійної міцності?

Мінімальна термодинамічна робота адгезії двох твердих тіл визначається термодинамічною роботою когезії компонента композиції, що має менший поверхневий натяг. Підвищення адгезійної міцності (механічних властивостей композитів) можна досягнути підвищенням поверхневого натягу (когезійної міцності) полімерного зв'язного (при умові, що поверхневий натяг зв'язного менший поверхневого натягу наповнювача).

Когезійна міцність полімерної матриці зростає зі збільшенням молекулярної маси полімеру; звуженням молекулярно-масового розподілу; зі зростанням орієнтації (ступеня кристалічності) термопласту чи густини полімерної сітки реактопласту; при модифікації

полімерної матриці пластифікаторами, структуротвірними та іншими модифікуючими добавками.

Метод направленої регулювання структури і властивостей полімерів за рахунок використання малої кількості низько- і високомолекулярних сполук, які мають відмінну від полімеру будову, часто називають легуванням. Як легувальні добавки можуть використовуватися олігомери і полімери. Добавки, що вводяться в полімери в невеликій кількості, звичайно розміщуються в аморфних зонах чи на межі кристалічних утворень, чим змінюють характер їх взаємодії.

Прикладом додатків можуть бути структуротвірні – речовини, що не взаємодіють з полімером і мають температуру топлення вищу, ніж температура топлення полімеру. Структуроутворювачами можуть бути оксиди і хлориди металів, сажа й інші речовини, які сприяють формуванню в полімері дрібносферолітної структури. В'язкість розтопів таких матеріалів звичайно зменшується.

Не суміщаючись із полімером, модифікуючі добавки локалізуються в міжструктурних областях полімеру і сприяють росту рухомості прохідних ланцюгів макромолекул в невпорядкованих зонах і підвищенню загальної рухомості елементів надмолекулярних структур. При цьому прискорюються процеси релаксації, що сприяє зниженню залишкових напружень і підвищенню впорядкованості структури полімеру, особливо в аморфних областях. В результаті покращуються технологічні властивості і підвищується когезійна міцність полімеру.

Введення модифікуючих додатків у композити не тільки прискорює релаксаційні процеси, але і змінює характер взаємодії полімеру з наповнювачем, що сприяє утворенню більш термодинамічно стійких структур.

Наприклад, полістирол, який модифікований термоеластопластами, має вищу текучість і підвищену ударну в'язкість. Модифікація полівінілхлориду олігомерами різної будови також призводить до збільшення ударної в'язкості, текучості і деформовності. Введення модифікуючих додатків в поліетилен і в поліамід сприяє зниженню залишкових напружень і підвищенню когезійної міцності.

Інший шлях створення адгезивів з підвищеними характеристиками полягає у використанні взаємопроникаючих полімерних сіток. Збільшення адгезійної міцності в цьому випадку досягається завдяки двом факторам: зростанню енергії когезії адгезиву на основі взаємопроникаючих полімерних сіток і зниженню залишкових напружень протягом формування адгезійного сполучення.

Когезійну міцність полімерного зв'язного можна регулювати, змінюючи температурно-часові параметри переробки композитів (регулюючи температуру затвердження, швидкість піднімання температури, швидкість охолодження, час витримки).

Як показано П.А.Ребіндером, міжфазна поверхнева енергія в композитах тим менша, чим ближча полярність компонентів адгезійного сполучення. Згідно правила полярності П.А.Ребіндера міцне адгезійне сполучення не можна отримати при взаємодії полярного адгезиву з неполярним субстратом та неполярного адгезиву з полярним субстратом. Як потім виявилось, друга частина правила помилкова.

Отже, стан поверхні наповнювача значно впливає на властивості композитів.

Основні фактори, що характеризують стан поверхні наповнювача і визначають основні властивості композитів, такі:

1. ступінь чистоти поверхні – обумовлює необхідність вилучення вологи, жирів й інших домішок, які вносяться в процесі отримання наповнювача;
2. ступінь розвинутої чи шорсткості поверхні, який визначає повноту змочування і можливість утворення на межі розподілу фаз слабких граничних шарів, що можуть бути причиною руйнування матеріалу;

3. хімічна однорідність поверхні.

Регулювання адгезійної взаємодії можливе за рахунок поверхневої модифікації наповнювачів, що досягається зміною технологічних параметрів їх одержання, поверхневим окисненням, нанесенням “прямих” замаслювачів на волокна, які одночасно з текстильною обробкою волокон забезпечують високу адгезію до них зв'язних, апретуванням.

Встановлено, що поверхневий натяг волокон зростає із зменшенням їх діаметру та швидкості витягування. Це пояснюють тим, що при постійній швидкості витягування ділянки волокон з меншим діаметром більше орієнтовані.

Поверхнєве окиснення вуглецевих волокон рідкофазними (азотною кислотою, сумішшю азотної і сірчаної кислоти тощо) та газофазними (озоном, киснем, галогенами тощо) окиснювачами підвищує адгезію в системі вуглецеве волокно - зв'язне і відповідно міцність вуглепластиків (табл. 7.1).

Таблиця 7.1.

Властивості вуглепластиків на основі поліпропілену 21030 і вуглецевих волокон Урал-ЛО-24, що зазнали окиснення киснем повітря при температурі 823К, в залежності від часу витримки

Час витримки, хв.	Міцність при розтягу, МПа	Модуль пружності при вигині, ГПа	Ударна в'язкість, кДж/м ²
0	45,0	2,09	13,0
5	47,6	2,52	9,6
10	51,1	2,65	9,1
15	54,4	2,70	7,9
20	53,8	2,71	7,6
30	51,4	2,68	7,2

Зростання міцності композиту пояснюється зміцненням вуглецевих волокон за рахунок удосконалення їх структури при травленні дефектного поверхневого шару. Не виключено зростання адгезії і за рахунок додаткових зв'язків між полімерною матрицею і кисневмісними групами активованих вуглецевих волокон. Тобто починає виконуватися нерівність $\sigma_m > \sigma_p$, яка є умовою досягнення високої адгезії.

Апрети – речовини, що мають функціональні групи двох типів: одні з певною спорідненістю до поверхні наповнювача, інші – до полімеру. Апрет наносять на поверхню наповнювача, його можуть також вводити в полімерну матрицю. Іноді проводять одночасно апретування наповнювача і введення апрету в полімерне зв'язне.

Апретування покращує умови змочування поверхні наповнювача полімером, що збільшує адгезію. Крім того, вона зростає за рахунок хімічної взаємодії в системі полімер-апрет-наповнювач. Апретування також знижує рівень залишкових напружень у композиті.

Як апрети використовуються кремнійорганічні сполуки, органо-титанати, стеарати металів і інші речовини. Найчастіше вміст апрету становить 0,1 ÷ 3,0 % від маси наповнювача.

Експериментальні дані свідчать про те, що на межі розподілу фаз полімер-апретований наповнювач можуть утворюватися як хімічні, так і фізичні (в тому числі і водневі) зв'язки, для механізму підсилення композиту важливо утворення певного числа достатньо міцних зв'язків незалежно від їх природи.

Таким чином, для отримання композитів з високими механічними властивостями необхідна певна оптимальна кількість міцних зв'язків. Велике число зв'язків зменшує рухомість макромолекул в граничному шарі, збільшує залишкові напруження, змінюючи

структуру поверхневого шару. Це може призвести до появи дефектних областей і зниженню адгезії.

Покращення властивостей полімерних композиційних матеріалів може бути досягнуто шляхом обробки армуючих наповнювачів полімерними апретами. Причина цього, як показано академіком Ю.С.Ліпатовим, може полягати у можливості утворення перехідних шарів між полімером апрету і полімером зв'язного.

Підвищення механічних властивостей композиту можна досягнути в результаті зміни умов релаксації залишкових напружень в граничному шарі. Чим нижче такі залишкові напруження, що є наслідком адсорбційної взаємодії на межі розподілу фаз, тим вище адгезійна міцність. Перспективно використання двокомпонентних зв'язних, що характеризуються різною адгезією до поверхні наповнювача.

В результаті термодинамічної несумісності зв'язних буде відбуватися переважно адсорбція одного з них на поверхні наповнювача і утворення демпфуючого перехідного шару. Особливо перспективним є використання як зв'язних взаємопроникаючих полімерних сіток, що дозволяють майже повністю виключити виникнення залишкових напружень.

Адгезійна міцність залежить також від товщини адгезиву. Чим тонший шар адгезиву, тим вища адгезійна міцність. Це викликано меншою дефектністю тонкої плівки адгезиву (діє масштабний фактор). Деформація плівки адгезиву в тонкому шарі при руйнуванні менша, ніжча рівня залишкових напружень.

Ще в 30-х роках П.А.Ребіндером викладені думки, що адсорбція макромолекул полімерів на поверхні частинок наповнювача супроводжується виникненням адсорбційного шару з підвищеними механічними властивостями, в результаті чого при певному змісті наповнювача значно підвищується міцність системи. Дослідженнями, що проведені у наш час, встановлено значне підвищення температури склування при введенні наповнювача до багатьох полімерів. Показано, що температура текучості ще більше залежить від типу і кількості наповнювача, ніж температура склування. Визначено також значний вплив наповнювача на густину, густину сітки, коефіцієнт розширення, електричні властивості полімерів. Зміна термодинамічних властивостей полімерів в присутності наповнювачів відбувається на значному віддаленні від твердої поверхні. У тонкому шарі на поверхні наповнювача може спостерігатися епітаксія - орієнтоване наростання шарів полімеру.

Обширні дослідження в області механізму взаємодії полімеру з наповнювачем виконані в останній час академіком Ліпатовим Ю.С. і його школою. Згідно сучасним уявленням, введення в полімер частинок наповнювача супроводжується утворенням граничного шару полімеру біля твердої поверхні, і така система може розглядатися як трикомпонентна (полімер, граничний шар, наповнювач). Із збільшенням концентрації наповнювача все більша частина полімеру знаходиться у міжфазному шарі, що змінює фізико-хімічні властивості полімеру в граничному шарі і впливає на властивості всієї системи.

Обмеження молекулярної рухомості в адсорбційних і поверхневих шарах викликає труднощі для протікання релаксаційних процесів, що призводить до зростання залишкових (внутрішніх) напружень і зменшення адгезійної міцності. Напруження, що виникають в процесі виготовлення композитів, називають залишковими тому, що вони не зникають після зняття теплових чи силових полів. Залишкові напруження викликають передчасне руйнування виробів, їх розтріскування, зміну форми і розмірів, що призводить до втрати ними працездатності.

Які ж причини виникнення залишкових напружень?

По-перше, гетерофазність композитів, складові яких розрізняються пружними і теплофізичними характеристиками. Ю.С.Ліпатовим вводиться поняття мікрогетерогенності в багатокомпонентних полімерних системах та дається її класифікація:

1. Молекулярна мікрогетерогенність, яка проявляється в зміні у міжфазному шарі фізичних характеристик, що визначаються макромолекулярною будовою полімерних ланцюгів (термодинамічні властивості, молекулярна рухливість, густина пакування, вільний об'єм, рівень міжмолекулярної взаємодії тощо).
2. Структурна мікрогетерогенність, що визначається зміною взаємного розташування макромолекул одна відносно іншої у поверхневих і перехідних шарах на різному віддаленні від фазової межі і яка характеризує близький порядок у аморфних полімерах і ступінь кристалічності в кристалічних полімерах.
3. Мікрогетерогенність на надмолекулярному рівні, що визначається розбіжностями в типах і характері формування і пакування надмолекулярних структур у поверхневих шарах і в об'ємі.
4. Хімічна мікрогетерогенність, яка обумовлена впливом межі розподілу фаз на реакцію формування макромолекул.

По-друге, причиною виникнення залишкових напружень у композитах є відмінність пружних і теплофізичних характеристик пластика і сталі, з якої виготовлено оснащення.

Нарешті, по-третє, залишкові напруження виникають в результаті структурної і хімічної неоднорідності полімерного виробу, що викликано нерівномірністю розподілу теплових і силових полів при їх одержанні.

Слід пам'ятати, що залишкові напруження є результатом не тільки формування адгезійного сполучення з точки зору протікання в ньому хімічних реакцій і релаксаційних процесів, але і міцної адсорбційної взаємодії компонентів адгезиву з поверхнею. Якщо полімерний ланцюг гнучкий, то йому легше пристосуватися до поверхні, кількість точок контакту більше, а нерівноважність системи і залишкові напруження, що обумовлені взаємодією з поверхнею, менші, ніж для жорсткого ланцюга. Так як процес встановлення рівноваги має релаксаційний характер, то процес формування адгезійного сполучення повинен проводитися в умовах оптимального співвідношення між швидкостями затвердження (охолодження) і встановлення стану рівноваги в композиті на межі розподілу фаз. Залишкові напруження в композиті можна розрахувати за формулою:

$$\sigma_{зал} = \frac{E_B \cdot E_M \cdot (\alpha_M - \alpha_B)}{E_M + \mu \cdot E_B} \cdot \Delta T, \quad (7.13)$$

де: $\sigma_{зал}$ – залишкові напруження; E_B, E_M – модуль пружності волокна і полімерної матриці відповідно; α_B, α_M – коефіцієнт термічного розширення волокна і полімерної матриці відповідно; μ – коефіцієнт Пуансона; ΔT – різниця температур між температурою формування композиту і кімнатною температурою.

Виходячи із формули (7.13), для зниження залишкових напружень необхідно зниження модулів пружності компонентів композиту, зниження температури переробки композиту, використання наповнювачів з більш високим коефіцієнтом термічного розширення, а полімерних зв'язних – з більш низьким коефіцієнтом термічного напруження.

Внутрішні напруження можна знизити в композитах шляхом введення в полімерну матрицю пластифікаторів, легуючих додатків, обробкою поверхні наповнювачів поверхнево-активними речовинами. Це підвищує рухомість макромолекул на межі розподілу фаз, але зменшує адгезію зв'язного до наповнювачів.

Залишкові напруження можна знизити також проведенням термічної обробки композитів. Термообробка – метод направленої зміни властивостей полімерних матеріалів, який полягає в нагріванні виробу, витримці його при певній температурі і наступному повільному охолодженні. В результаті термообробки покращуються механічні властивості виробів, знижуються залишкові напруження, що накопичились у виробі при формуванні, стабілізуються його розміри.

Аналіз процесів, які протікають на межі розподілу фаз, висвітлюють близько десятка теорій адгезії (механічна, молекулярна, електрична, дифузійна теорія адгезії та ін.) Вони добре описані в спеціальній літературі, яка вказана в даному навчальному посібнику і до якої ми відсилаємо студентів.

7.3. Основи технології переробки та використання полімерних композиційних матеріалів

7.3.1. Склопластики

Склопластики – полімерні композиційні матеріали, армуючим наповнювачем яких є скляні волокна. Полімерними зв'язними склопластиків можуть бути реакто- і термопласти.

Властивості склопластиків залежать: від природи армувального наповнювача і полімеру; від співвідношення компонентів і геометричних розмірів наповнювача; від фізико-хімічних процесів на межі розподілу фаз тощо.

Скляні волокна мають ряд цінних властивостей:

1. високу міцність при розтягу (3000 ÷ 4500 МПа);
2. високу тепло- і вогнестійкість: вони не горять і не підтримують горіння, а висока температура плавлення (950 ÷ 1260 °С) дозволяє використовувати їх в області високих температур;
3. підвищену хімічну стійкість і вологостійкість (водопоглинання 0,2 % при 65 % вологості);
4. високі термічні (низький коефіцієнт лінійного розширення і високий коефіцієнт теплопровідності) і електричні властивості.

Властивості скляних волокон залежать: від хімічної природи компонентів, способу і технологічних параметрів одержання, від діаметру елементарного волокна.

Вихідними матеріалами для одержання скловолкна є глинозем, кремнезем, окис кальцію, окис магнію, борний ангідрид та спеціальні добавки (магнійалюмосилікатне) скло.

Найбільшого поширення здобули волокна з таких видів скла:

- А-скло – високолужне (вапняно - натрієве) скло;
- С-скло – хімічно стійке (натрійборосилікатне) скло;
- Е-скло – електроізоляційне (алюмоборосилікатне) скло;
- S-скло – високоміцне (магнійалюмосилікатне) скло.

Властивості скляних волокон вказаних марок подані в таблиці 7.2. Високоміцні, високомодульні скловолкна одержують з алюмоборосилікатного і магнійалюмосилікатного скла. Процес одержання скловолкон може бути одно- або двостадійним. При одностадійному процесі подрібнену суміш компонентів подають у піч. Розтоплена маса поступає в обладнання для розтопного формування.

Таблиця 7.2.

Властивості скловолкон

Властивості	Марка скла			
	А	С	Е	S
Густина, кг/м ³	2500	2490	2540	2480
Міцність при розтягу, МПа	3033	3033	3448	4585
Відносне видовження при розриві, %	–	4,8	4,8	5,7
Модуль пружності при розтягу, МПа·10 ⁻³	50,0	69,0	72,4	85,5
Коефіцієнт лінійного термічного розширення, ·10 ⁶ , К ⁻¹	8,6	7,2	5,0	5,6
Температура розм'якшення, °С	727	749	841	–

Основні стадії одержання скловолокон за двостадійним процесом:

- розмелення і змішування компонентів;
- топлення, одержання напівфабрикату (скляні кульки діаметром близько 20 мм, або короткі стержні);
- засипання напівфабрикату в плавильні форми (човники), плавлення при температурі $1200 \div 1400$ °С;
- витягування чи видування неперервних ниток;
- наоліювання чи апретування;
- намотування волокон на бобіну.

Із скломаси витягують чи видувають через філь'єри, що знаходяться в дні стоплювальних форм, неперервні елементарні волокна, які утворюють комплексні нитки. Комплексні нитки мають 51, 102 чи 204 елементарних волокон. Вони проходять через ванну із замаслювачем чи апретом, і після відтиснення надлишків рідини їх намотують на бобіну.

Замаслювач (шліхта) запобігає злипанню комплексних ниток (джгутів), надає їм гнучкості і запобігає стиранню при подальшій переробці. Замаслювач вміщує мастильні речовини (мінеральні оливи, жирні кислоти), зв'язні (полівініловий спирт, декстрину, парафін, полівінілацетат тощо), поверхнево-активні речовини (аміноспирти, цетилтриметиламонійбромід тощо). Таким чином, скляні тканини, нитки і скляні мати мають на своїй поверхні значну кількість замаслювача.

В присутності замаслювача зменшується здатність зв'язного до змочування і знижується його адгезія до скляних волокон, що погіршує властивості склопластиків.

Тому перед використанням скловолокнистих наповнювачів необхідно провести усунення замаслювача з поверхні скляних волокон за допомогою органічних розчинників (наприклад, бензину), або ж термічною обробкою при температурі $200 \div 450$ °С.

Обробка скляних волокон апретами підвищує адгезію до них полімерної матриці. Тип апрету залежить від складу скловолокна і зв'язного. Як апрети найчастіше використовуються кремнійорганічні сполуки (метил-, етилхлор- і етоксисилани і ін.) та металорганічні сполуки.

Міцність скляних волокон залежить від їх діаметру, збільшуючись із зменшенням останнього. Текстильній обробці найкраще підлягають скляні волокна діаметром $4 \div 7$ мкм. При виробництві скловолокнистого анізотропного матеріалу типу СВАМ використовується елементарне скловолокно діаметром $15 \div 30$ мкм. При зростанні діаметру скляних волокон від 10 до 100 мкм міцність при розтягу орієнтованого епоксифенольного склопластику зменшується від 1700 МПа до 900 МПа.

Елементарне скляне волокно використовується як армувальний наповнювач при виготовленні СВАМу. У виробництві інших типів склопластиків використовують скловолокнисті наповнювачі у вигляді: 1) комплексних ниток (неперервних чи штапельних), а також джгутів, 2) скляних тканин і 3) матів.

Як полімерні матриці склопластиків використовуються переважно термореактивні зв'язні (поліестерні, феноло-формальдегідні, кремнійорганічні і ін.) Раніше вже вказувалось, що зв'язні просочують наповнювач і після затвердження склеюють між собою окремі волокна (шари наповнювача), забезпечуючи співдію їх в композиті. Для виконання цієї функції зв'язні повинні задовольняти таким вимогам:

1. мати високу когезійну міцність;
2. забезпечувати гарну змочуючу здатність і адгезію до скляного наповнювача;
3. мати незначну усадку, що не викликає утворення в зв'язному мікротріщин;
4. швидко затверджуватися (по можливості без виділення летких продуктів);
5. тривалий час не змінювати в'язкість, щоб забезпечити просочування скляного наповнювача до гелеутворення (тобто зберігати тривалу життєздатність).

Крім того, зв'язне повинно відповідати вимогам, що висуваються до готових виробів, як-то: мати високу штивність, теплостійкість, хімічну стійкість, високі електроізоляційні властивості, довговічність при експлуатації в різних умовах тощо.

Останнім часом як полімерне зв'язне використовують термопласти (поліпропілен, поліаміди і ін.)

7.3.1.1. Поліестерні смоли

Для одержання склопластиків у світі широке застосування знайшли поліестерні смоли. Так, в США більше 80 % склопластиків виготовляють на основі поліестерних смол.

У вітчизняній промисловості для виготовлення армованих пластиків використовують ненасичені поліестерні смоли різноманітного призначення: ПН-1 – смола загального призначення, яка містить стирол; ПН-11 – смола загального призначення, яка не містить легкого мономеру; ПН-3 – смола підвищеної теплостійкості; ПН-1С, ПН-3С і ПН-6 – смоли підвищеної вогнестійкості, що містять стирол; ПН-62 і ПН-63 – смоли, що не містять легкого мономеру і мають в затвердженому стані підвищені теплостійкість і вогнетривкість; ПН-10 – смола з підвищеною стійкістю до дії води і кислот; ПН-2 і ПНМ-8 – смоли, що застосовують як зв'язні для виготовлення світлопроникаючих виробів.

Переваги поліестерних смол: 1) дешевизна; 2) затвердження при низькій (кімнатній) температурі.

Недоліки поліестерних зв'язних: 1) підвищена горючість; 2) низька теплостійкість (120 °С); 3) процес затвердження поліестерних смол супроводжується виділенням великої кількості тепла, збільшенням густини і зменшенням об'єму смоли, тому усадка поліестерних смол досягає 7 ÷ 11 % (іноді 15 %); 4) низька життєздатність (близько 1,5 години); 5) низька адгезія до скляних волокон.

7.3.1.2. Епоксидні смоли

У промисловості широко використовують декілька видів епоксидних зв'язних: епоксидіанові (ЕД-22, ЕД-20, ЕД-16 тощо), епоксидноволачні (ЕН-6, 5Н тощо); циклоаліфатичні (УП-612, УП-672 тощо). Для шаруватих пластиків в Україні розроблені епоксидні зв'язні серії ПОЛКОМ.

Переваги епоксидних зв'язних: 1) висока адгезія до скляних волокон; 2) високі механічні і діелектричні характеристики; 3) мала усадка при затвердженні; 4) в процесі затвердження не виділяється вода і легкі речовини, що дозволяє при виготовленні епоксипластів застосовувати низький тиск (до 0,7 МПа); 5) достатня хімічна стійкість; 6) здатність суміщуватися з іншими смолами.

Недоліки епоксидних смол: 1) недостатня термостійкість; 2) висока вартість.

7.3.1.3. Феноло-формальдегідні смоли

Для виготовлення склопластиків використовують новолачні феноло-формальдегідні смоли (наприклад, СФ-010 тощо) та резольного типу (бакелітові лаки ЛБС-1, ЛБС-4, ЛБС-9, ЛБС-20 тощо).

Для виготовлення скловолонистих прес-матеріалів широко використовується також модифіковане полівінілбутиралем феноло-формальдегідне зв'язне Р-2М. На його основі виготовляють скловолонисті прес-матеріали АГ-4В, АГ-4С, АГ-4НС, ДСВ-4Р-2М, ДСВ-2Р-2М, СВМ-Р-2М, НПС-Д тощо.

Переваги феноло-формальдегідних смол: 1) високі тепло- і термостійкість; 2) високі механічні властивості (модуль пружності, твердість тощо).

Недоліки феноло-формальдегідних смол: 1) висока крихкість; 2) недостатня адгезія до скловолон; 3) висока усадка 6 ÷ 9 %; 4) при затвердженні феноло-формальдегідних смол

виділяється значна кількість летких речовин, що викликає необхідність застосування високого тиску при виготовленні виробів (до 40 МПа).

Для усунення недоліків феноло-формальдегідні смоли модифікують полівінілацеталами, епоксидними, фурфурольними, кремнійорганічними полімерами. Наприклад, полівінілформальєтилаль входить у склад зв'язного ВФТ, а фурфурол – у зв'язне ФН.

7.3.1.4. Кремнійорганічні смоли

Кремнійорганічні смоли застосовують для виготовлення склопластиків термоізоляційного і електроізоляційного призначення.

Переваги кремнійорганічних смол: 1) висока теплостійкість (до 250 °С); 2) хімічна стійкість, водотривкість; 3) високі діелектричні властивості у широкому інтервалі температур і вологості.

Недоліки кремнійорганічних смол: крихкість, недостатня механічна міцність. Для підвищення механічних властивостей кремнійорганічні полімери модифікують епоксидними, феноло-формальдегідними й іншими смолами.

7.3.1.5. Поліаміди

Як полімерну матрицю використовують аліфатичні поліаміди (капрон, поліамід 6,6, поліамід 6,10, поліамід 12) і термостійкі ароматичні поліаміди (фенілон).

Поліаміди виділяються серед термопластів високою міцністю при розриві, ударною в'язкістю, низьким коефіцієнтом тертя, високою зносостійкістю, стійкістю до більшості органічних розчинників, низькою в'язкістю розтопу.

Недоліком поліамідів є відсутність стійкості до розчинів кислот і окиснювачів, недостатня теплостійкість аліфатичних поліамідів (деталі зберігають форму під навантаженням до 50 ÷ 65 °С, без навантаження – до 140 ÷ 150 °С).

7.3.1.6. Властивості склопластиків

Як вже вказувалося раніше, міцність склопластиків змінюється в широкому інтервалі в залежності від властивостей компонентів, їх стану, ступеня текстильної переробки армуючого наповнювача і технології переробки. В таблиці 7.3 подані властивості склопластиків на основі феноло-формальдегідного зв'язного, а в таблиці 7.4 – властивості деяких склотекстолітів.

Таблиця 7.3.

Механічні і теплофізичні властивості склопластиків на основі феноло-формальдегідного зв'язного

Властивості	Вид склопластику					
	АГ-4С	АГ-4В	П-5-2	АГ-4С стрічка 20 мм	ДСВ-4-Р- 2М	ДСВ-2-Р- 2М
Густина, кг/м ³	1700- 1900	1700- 1900	1700- 1900	1700-1800	1700-1850	1700-1850
Міцність, не менше при розтягу, МПа при стисненні, МПа при вигині, МПа	500	80	300	40	–	–
	200	130	130	120	130	130
	250	120	140	110	200	240
Ударна в'язкість, кДж/м ²	150	30	50	–	70	70
Теплостійкість за Мартенсом, °С	280	280	–	280	280	280
Водопоглинання за						

24 год., %	0,2	0,2	1,7	0,2	0,22	0,2
------------	-----	-----	-----	-----	------	-----

Найбільш високі експлуатаційні характеристики мають однонаправлені склопластики на основі епоксидного зв'язного (табл. 7.5).

Склопластики використовують для виготовлення значно навантажених виробів, що працюють в сухих і вологих середовищах при температурі до 350 °С, а також для виробів, які мають високі діелектричні властивості і радіопрозорість.

Склопластики з орієнтованими скловолонками використовуються в транспортному машинобудуванні (силові елементи автомобілів і вагонів, цистерни, баки і трубопроводи), в літакобудуванні (силові і допоміжні елементи літаків і гелікоптерів), в ракетобудуванні (корпуси двигунів, раструби сопел, обтікачі, балони високого тиску тощо), в будуванні (облицювальні панелі, труби тощо), в сільському господарстві (силосні башти, теплиці), в хімічній промисловості (корозійностійкі ємності, труби).

Таблиця 7.4.

Механічні властивості деяких склопластиків

Показники	Марка склотекстоліту			
	СТ-911С	ЭФ 32-301	ФН	СКМ-1
	поліестер-на смола	епоксидно-фенольна смола	феноло-фурфурольно-формальдегідна смола	кремній-органічна смола
Міцність при розтягу, МПа				
вздовж основи	430	408	350	210
вздовж утоку	–	225	195	170
Міцність при стисненні, МПа				
вздовж шарів	153,5	260	107	61
перпендикулярно шарів	–	420	–	–
Міцність при вигині, МПа	270	414	213,5	140
Ударна в'язкість, кДж/м ²				
вздовж основи	525	148	180	60
вздовж утоку	–	120	–	55

Таблиця 7.5.

Механічні властивості однонаправлених склопластиків на основі скляних волокон різного хімічного складу і епоксидного зв'язного (вміст скловолонка 70 об.%)

Тип волокна	Середня міцність волокон, МПа	Модуль пружності волокон, МПа	Міцність склопластику при розтягу, МПа	Модуль пружності склопластику, МПа	Міцність склопластику при стисненні, МПа
Алюмоборосилікатне (Е-скло)	2 800	74 000	1 850	58 000	1 500
Магнезійно-алюмосилікатне	5 000	95 000	2 500	70 000	1 950
Високомодульне	4 500	110 000	1 920	78 000	2 000

Склопластики, які армовані дискретними (рубаними) скловолонками застосовуються в суднобудуванні (човни, яхти), в автобудуванні (конструкційні елементи легкових і вантажних автомобілів), в будуванні (листові матеріали, дачні будиночки, плавальні басейни, світлопрозора покрівля тощо).

Армуючими наповнювачами термопластів можуть бути короткі (довжиною $3 \div 12$ мм) волокна діаметром $9 \div 13$ мкм. Ступінь наповнення композитів – $10 \div 50$ мас. %.

Наповнення скловолокном збільшує міцність термопластів в $2 \div 3$ рази, модуль пружності – в $3 \div 5$ разів, збільшує теплостійкість на $50 \div 180$ °С, покращує стабільність розмірів деталей. В таблицях 7.6 і 7.7 подані властивості склопластиків на основі термопластів першого і другого покоління.

Таблиця 7.6.

Властивості склопластиків на основі термопластів першого покоління

Показники	Поліпропілен + 20-40% СВ	ПА-6 + 30% СВ	АБС + 30% СВ	Поліацеталь + 30% СВ	Полібутилен терефталат + 30% СВ	Полікарбонат + 30% СВ
Густина, кг/м ³	1050 ÷ 1240	1370	1280	1630	1520	1350
Міцність при розтягу, МПа	45 ÷ 50	161	100	137	137	112
Модуль пружності при вигині, МПа	2000 ÷ 3200	8400	7700	9800	10000	5600
Ударна в'язкість, кДж/м ²	30	120	75	100	140	110
Температура розм'якшення при вигині (P=1,8 МПа), °С	135	217	105	165	220	146

Таблиця 7.7.

Властивості склопластиків на основі термопластів другого покоління.

Показники	Полісульфон + 30% СВ	Полефірсульфон + 30% СВ	Полефірімід + 30% СВ	Поліфеніленсульфід + 30% СВ	Полефірефіркетон + 30% СВ
Густина, кг/м ³	1450	1600	1570	1560	1490
Міцність при розтягу, МПа	126	133	200	140	175
Модуль пружності при вигині, МПа	8400	8400	8800	11200	7700
Ударна в'язкість, кДж/м ²	97	80	90	150	115
Температура розм'якшення при вигині (P = 1,8 МПа), °С	185	213	210	260	316

В Україні склонаповнений поліпропілен виготовляє технологічний Інститут “Армопласт”, а склонаповнений поліамід – ВО “Склопластик” (м. Северодонецьк). В Росії склонаповнений поліпропілен (АРМЛЕН) і склонаповнений поліамід (АРМАМИД) випускає НВП “Поліпластик” (м. Москва).

Антифрикційні склонаповнені поліаміди використовують для роботи у вузлах тертя машин і механізмів, склонаповнений поліпропілен – для виготовлення деталей електровиміральної та побутової апаратури, а також конструкційних елементів, що працюють в хімічно агресивних середовищах (наприклад, вентиля для гальванічних ванн). Склонаповнені поліаміди з підвищеною міцністю (табл. 7.8) рекомендують для виготовлення високонавантажених деталей, так як їх механічні властивості на $30 \div 50$ % вищі, ніж властивості склонаповнених поліамідів, що випускаються серійно.

Вченими технологічного Інституту “Армопласт” (м. Северодонецьк) розроблені листові матеріали на основі склонаповненого поліпропілену: ЛСТ-ІІІ і “ЛІСІАР”. Ці композити є аналогами зарубіжних листових склоармованих термопластів (наприклад, матеріалу “Azdel” фірми GEPlastics).

ЛСТ-ПП – жорсткий термопластичний прес-матеріал. До його складу входять: модифікований поліпропілен (полімерна матриця) і склополотно з неперервних скляних ниток, що з'єднані між собою шляхом голкопрошивання чи просочування поліефірним зв'язним. Таким чином, наповнювач у композиті знаходиться у хаотичному стані. Ступінь наповнювання композиту складає 65 ± 5 %. Суміщення поліпропілену із склонаповнювачем здійснюється на стрічковому пресі. Стрічковий прес – двоярусний транспортер із нескінченних сталених стрічок, що натягнуті на привідні і ведучі барабани. Суміжні ділянки стрічок і утворюють формуючий канал.

Таблиця 7.8.

Властивості склонаповнених поліамідів з підвищеною міцністю (ТУ 6-19-073-108-89)

Властивості	Поліамідна матриця		
	ПА-6	ПА-66	ПА-610
Густина, кг/м ³	1350 ÷ 1380	1350 ÷ 1380	1290 ÷ 1330
Міцність, МПа			
при розтягу	170	180	147
при вигині	240	255	225
Ударна в'язкість, кДж/м ²	50	45	35
Теплостійкість при вигині ($P = 1,85$ МПа), °С	204	250	204
Усадка, %	0,3 ÷ 0,6	0,6 ÷ 0,9	0,4 ÷ 0,6
Водопоглинання за 24 години (до насичення), %	1,05 (7,0)	1,05 (6,8)	0,4 (2,1)
Питомий об'ємний електричний опір, Ом·см	10^{14}	10^{15}	10^{15}

Основні переваги матеріалу – легкість його переробки у виробі прямим пресуванням, можливість виготовлення складних за конфігурацією і декорованих виробів.

Матеріал “ЛИСТАР” – м'який полотно-подібний матеріал, що складається з порошкового поліпропілену і рублених скляних моноволокон. Вміст в ньому скляних волокон – 65 ± 5 мас. %.

Матеріал одержують за папероробною технологією з використанням водної рідкої фази, в якій проходить розщеплення комплексних скляних ниток на моноволокна. У водну фазу також вводиться порошкоподібний термопласт (поліпропілен). Потім водна дисперсія, яка вміщує скляні моноволокна і поліпропілен, виливається на сітчастий конвеєр. Вода відсмоктується, а формополотно сушиться гарячим повітрям, охолоджується і згортається у рулон.

Матеріал “ЛИСТАР” може перероблюватися у виробі крім прямого пресування також методами термоформування.

Матеріали ЛСТ-ПП і “ЛИСТАР” використовуються для виробництва крупногабаритних деталей для транспортного машинобудування (внутрішніх панелей дверцят автомобілів, полицок, покриттів акумуляторних скриньок тощо).

Властивості листових матеріалів на основі склонаповненого поліпропілену подані в таблиці 7.9.

7.3.2. Вуглепластики

Пластики, які армовані вуглецевими волокнами, мають високу теплостійкість і низьку температуру крихкості (широкий робочий температурний інтервал). Серед усіх армованих пластиків вуглепластики мають найбільшу жорсткість і теплостійкість. У порівнянні із склопластиками вуглепластики мають більшу питому жорсткість, втомлювальну міцність, тривалу міцність. Тому використання вуглепластиків на основі високоміцних

високомодульних вуглецевих волокон найбільш ефективно тоді, коли необхідно знизити вагу виробу і забезпечити йому необхідну міцність і штивність. Високі механічні властивості вигідно виділяють вуглепластики серед конструкційних матеріалів. Особливо високі механічні властивості мають однонаправлені вуглепластики (табл. 7.10).

Таблиця 7.9.

Властивості листових матеріалів на основі склонаповненого поліпропілену

Властивості	Листовий матеріал	
	ЛСТ-ПП ТУ 6-19073102-89	ЛИСТАР ТУ 6-48133729212-91
Ширина, мм	450 ÷ 1800	600
Густина, кг/м ³ , не більше	1270	–
Поверхнева густина, г/м ²	–	750 ± 100
Міцність при розтягу, МПа, не менше	70	86
Модуль пружності при розтягу, ГПа, не менше	5,8	4,5
Міцність при вигині, МПа, не менше	112	140
Ударна в'язкість, кДж/м ²	36	50
Ударна в'язкість при $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$, кДж/м ² , не менше	33	–
Теплостійкість при вигині ($P = 1,8\text{ МПа}$), $^{\circ}\text{C}$	150	148

Висока стійкість вуглецевих волокон до дії більшості хімічних реагентів (крім окиснювачів) дозволяє використовувати вуглепластики при виготовленні апаратури для хімічної промисловості.

Вуглепластики мають низький коефіцієнт термічного розширення при високій тепло- і електропровідності, їм притаманна висока зносостійкість і низький коефіцієнт тертя, що дозволяє використовувати їх для виготовлення підшипників ковзання. Підшипники з вуглепластиків мають малу вагу, працюють безшумно, мають демпфуючу здатність, можуть працювати без змащування. Тому їх перспективно використовувати у вузлах тертя машин і механізмів.

Таблиця 7.10.

Властивості вуглепластиків і деяких конструкційних матеріалів

Матеріал	Густина $\cdot 10^{-3}$, кг/м ³	Міцність $\cdot 10^{-7}$, Па	Модуль пружності $\cdot 10^{-10}$, Па	Питома міцність $\cdot 10^{-4}$, Па \cdot м ³ /кг	Питомий модуль пружності $\cdot 10^{-7}$, Па \cdot м ³ /кг
Епоксидвуглепластик з високоміцними волокнами	1,6	130	17,2	82,2	10,8
з високоміцними вуглецевими волокнами	1,7	56	20,4	33,0	12,0
Епоксидсклопластик із S-скловолокном	2,12	192	6,9	91	3,25
Сталь	7,8	100	20,7	12,8	2,66
Сплави					
алюмінію	2,7	34,5	6,9	12,8	2,55
магнію	1,8	27,6	4,4	15,4	2,45
титану	4,5	93,1	11,0	26,0	2,45

Зараз до 70 % вуглепластиків застосовується в літакобудуванні, ракетній і космічній техніці. Незважаючи на високу вартість вуглепластиків, їх використання в цих галузях

економічно вигідно, так як прибуток від зниження маси комерційного літака складає 150 \$/кг, гелікоптера – 300 \$/кг, ракети – 10 000 \$/кг, складного космічного апарату – 50 000 \$/кг.

Споживання цих прогресивних матеріалів зростає також в автомобілебудуванні, так як зменшення маси автомобілів дозволяє знизити потужність двигуна і його вартість, а також скоротити витрати палива.

Вуглепластики також широко використовуються для виробництва спортивентарю і товарів для відпочинку. Розширюється об'єм їх споживання і в суднобудуванні. Застосування вуглецевих волокон збільшує на 14 % витрати на будівництво суден. Але ці витрати окуповуються менше, ніж за 2 роки за рахунок зниження маси корпусу судна, скорочення витрат пального, підвищення швидкості і вантажопідйомності судна. Зростають об'єми використання вуглепластиків в медицині, робототехніці, будівництві.

В таблиці 7.11 подано потужності з виробництва вуглецевих волокон в деяких регіонах світу. Домінуюче положення з виробництва цього матеріалу (за кількістю і якістю) займає Японія.

Таблиця 7.11.

Потужності і досягнуті максимальні показники вуглецевих волокон в окремих регіонах світу (1991 рік)

Регіон	Потужність, т	Максимально досягнуті показники	
		міцність, МПа	модуль пружності, МПа
Японія	3 700	7,2	500 ÷ 785
США	3 350	5,6	350 ÷ 450
Західна Європа	1 250	4,6	350 ÷ 450
Тайвань, Південна Корея, Ізраїль і ін.	750	3,0 ÷ 3,8	200 ÷ 330

Таким чином, вуглецеві волокна вигідно відрізняються серед волокон спеціального призначення комплексом своїх фізико-механічних властивостей, але гальмом для їх широкого використання залишається висока вартість. Серед армуючих наповнювачів частка вуглецевих волокон складає 1 %, а частка у вартості цих матеріалів – 25 %.

7.3.2.1. Вуглецеві волокна

Як вихідну сировину для одержання вуглецевих волокон найчастіше використовують віскозні (целюлозні) і поліакрилонітрильні волокна, а також нафтові і кам'яновугільні смоли (пеки). За фізико-механічними властивостями вуглецеві волокна поділяють на: високоміцні (≈ 3 ГПа); надвисокоміцні ($> 4,5$ ГПа); низькомодульні (≤ 100 ГПа); середньомодульні ($\approx 200 \div 320$ ГПа); високомодульні (≥ 350 ГПа); ультрависокомодульні (≥ 450 ГПа).

Шляхом піролізу в інертному середовищі (азоті, аргоні) целюлозних волокон виготовляють вуглецеві волокнисті матеріали різних текстильних форм (нитки, джгути, тканини, неткані матеріали, повсть тощо), різноманітних властивостей, призначення і областей застосування (теплозахисні, високоміцні, із заданими електрофізичними, сорбційними, ерозійними й іншими характеристиками).

Для одержання вуглецевих волокон високої якості велике значення має вихідна сировина. Результати досліджень показали, що найбільш придатною сировиною є гідратцелюлозні нитки.

На першому етапі при виготовленні вуглецевих волокон з гідратцелюлози вихідна пряжа (тканий матеріал) промивається органічними розчинниками чи поверхнево-активними речовинами для видалення органічних домішок, які можуть погіршити властивості

вуглецевих волокон. Волога також відноситься до небажаних домішок, тому перед карбонізацією вихідні волокна висушують протягом 0,5 ÷ 15 годин при температурі 100 ÷ 230 °С.

Процес карбонізації гідратцелюлози доцільно розподіляти на дві стадії: піролізу і власне карбонізації. Піроліз гідратцелюлози, що супроводжується найбільш швидким протіканням хімічних процесів і втратою маси матеріалу, призводить до отримання волокон, що мають лише 60 ÷ 70 % вуглецю. Втрата основної маси полімеру проходить у вузькій області температур в межах 200 ÷ 350 °С. До основних продуктів термічного розпаду целюлози відносяться низькомолекулярні леткі сполуки, смоли і коксовий залишок – вуглецеве волокно.

Піроліз целюлози супроводжується складними фізико-механічними перетвореннями. На початкових стадіях термообробки проходить гідроліз целюлози за рахунок сорбованої вологи. При температурах близько 200 ÷ 220 °С починається дегідратація целюлози з утворенням дегідроцелюлози. Процес відбувається протягом шести годин. При температурі вище 250 ÷ 280 °С починається деполімеризація целюлози з виділенням лівоглюкозану (видозміненої елементарної ланки целюлози). Піроліз целюлози закінчується при температурах 300 ÷ 350 °С.

На другій стадії (карбонізації) відбуваються подальші хімічні процеси і структурні перетворення, які призводять до утворення вуглецевих волокон з вмістом вуглецю до 95 %. Нижня межа температури карбонізації складає 900 ÷ 1000 °С, а верхня – 1300 ÷ 1500 °С.

Одержані волокна промивають, а потім сушать.

Часто проводять графітизацію вуглецевих волокон при температурах 1800 ÷ 2500 °С. На цій стадії проходить подальша ароматизація вуглецю і удосконалення структури волокон. При цьому вміст вуглецю у вуглецевих волокнах досягає 99 %. Для підвищення механічних властивостей вуглецевих волокон на стадії карбонізації і графітизації їх витягують, що призводить до зростання модуля Юнга і міцності волокон. Особливо механічні властивості зростають з підвищенням температури термообробки.

Після проведення стадії графітизації вуглецеві волокна миють і сушать.

В НВО “Хімволокно” (Росія) створені вуглецеві волокнисті матеріали з гідратцелюлози, які об’єднані умовно торгівельними назвами: УВК, углен, грален, УУТ-2, “Віскуп” (Урал). Як вихідна сировина для одержання матеріалів УВК, УУТ і “Віскуп” використовується технічна нитка, а для матеріалів “углен” і “грален” – віскозний штапельний джгут. Властивості цих матеріалів наведені в таблицях 7.12 ÷ 7.14.

Таблиця 7.12.

Властивості матеріалів УВК

Матеріал	Фізико-механічні властивості			Діаметр елементарного волокна, мкм	Рівноважна вологість при $W = 65\%$, %	Питома поверхня, м ² /г
	P, H	$E, \%$	$E, ГПа$			
УВК-16	820	3,5	31,9	7,1	0,6	1,3
УВК-20	870	2,8	35,1	6,9	0,4	1,3
УВК-22	890	2,5	35,3	6,8	0,3	1,3

Таблиця 7.13.

Властивості матеріалів „углен” і „грален”

Матеріал	Фізико-механічні властивості			Діаметр елементарного волокна, мкм	Рівноважна вологість при $W = 65\%$, %	Питома поверхня, м ² /г
	P, H	$E, \%$	$E, ГПа$			

Углен-9	420 ÷ 540	1,8 ÷ 2,5	19,5 ÷ 24,5	7 ÷ 10	6,0	40 ÷ 150
Грален-2	290 ÷ 420	1,3 ÷ 1,7	29,0 ÷ 39,0	6 ÷ 9	2,5	5 ÷ 10

Таблиця 7.14.

**Характеристики однонаправленого матеріалу марки “Віскум” (Урал)
на основі віскозної технічної нитки**

Характеристика	Норма
Ширина стрічки, мм	10 ÷ 500
Товщина, мм	0,2
Маса, м ² /г	150
Міцність мононитки, ГПа	1,5 ÷ 2,0
Модуль пружності, ГПа	80 ÷ 150
Відносне видовження при розриві основи, %	2
Вміст вуглецю, %	95 ÷ 99,9

В Україні налагоджено виготовлення з технічної низькомодульної вуглецевої тканини “Десна” (за ТУ 6-12-4691259-38-90). Властивості вуглецевої тканини з гідратцелюлози “Десна” подані в таблиці 7.15.

Таблиця 7.15.

Властивості технічної вуглецевої тканини “Десна”

Властивості	Норма для тканини	
	марка У	марка О
Розривне навантаження, Н, не менше		
– вздовж основи	686	539
– вздовж утоку	392	294
Поверхнева щільність, г/м ²	360	360
Вміст золи, %, не більше	3,5	не нормується

Процес одержання вуглецевих волокнистих матеріалів з поліакрилонітрильних (ПАН) волокон складається з підготовки вихідного матеріалу, окислення, високотемпературної обробки (карбонізації і графітизації).

Властивості вихідних ПАН-волокон (хімічний склад, структура, механічні властивості, дефекти) дуже впливають на якість вуглецевих волокон. Встановлено також, що умови формування мають більше значення, ніж хімічний склад ПАН-волокон. Більш бажаний прямий метод одержання ПАН-волокон з розчинів, так як в цьому випадку вони менше забруднені сторонніми речовинами. При формуванні сухим методом одержують більш однорідні волокна, ніж при формуванні мокрим методом.

Окиснення – найважливіша стадія одержання вуглецевих волокон. Попереднє окиснення полегшує дегідрування полімеру, підвищує температуру склування і термостійкість проміжних продуктів, зберігає орієнтацію і структуру волокна. Проміжні структури виконують роль матриці і сприяють формуванню структури вуглецевого волокна. Окиснення проводять в м'яких умовах (температура до 220 °С), середніх (температура 220 ÷ 250 °С) і жорстких умовах (температура більше 250 °С). Орієнтаційне витягування сприяє орієнтації передструктур, що виникають на стадії окислення волокон.

В процесі високотемпературної обробки здійснюється перехід від органічного до вуглецевого волокна, що супроводжується складними хімічними і структурними перетвореннями полімеру, ароматизацією вуглецю і формуванням структури вуглецевого волокна. При температурах 200 ÷ 600 °С протікають найбільш важливі хімічні процеси; в

інтервалах $400 \div 1200$ °С формуються основні елементи структури вуглецевих волокон; при температурах вище 1200 °С відбуваються переважно фізичні перетворення, які пов'язані з вдосконаленням структури вуглецевих волокон. В залежності від призначення волокон процес може закінчуватися при температурах $1000 \div 2000$ °С з одержанням карбонізованого волокна (вміст вуглецю – до 95 %).

Графітизацію ПАН-вуглецевих волокон проводять при температурах $2400 \div 2600$ °С. Вміст вуглецю в графітизованих волокнах досягає більше 99 %.

До 80 % усіх вуглепластиків у світі виготовляють з використанням високоміцних високомодульних вуглецевих волокон на основі поліакрилонітрилу.

В Росії виготовляють високоміцні, високомодульні і ультрависокомодульні волокна з поліакрилонітрилу у вигляді стрічок і джгутів (таблиця 7.16).

Таблиця 7.16.

**Фізико-механічні властивості вуглецевих волокон з поліакрилонітрилу,
які виробляються в Росії**

Марка волокна	Форма матеріалу	Міцність, ГПа	Модуль пружності, ГПа	Густина, г/см ³
ЛУ-П-0,1 і 0,2	Стрічка	$2,7 \div 3,0$	$250 \div 270$	1,7
Елур-П-0,1 і 0,08	Стрічка	$3,0 \div 3,2$	$200 \div 250$	1,7
УКН-П 5000 і 2500	Джгут	3,5	$210 \div 230$	1,75
УКН-П 5000 М	Джгут	$4,0 \div 4,5$	240	1,75
Кулон	Стрічка	2,5	$450 \div 500$	1,95
	Джгут	3,3	$450 \div 500$	1,95
Кулон – М	Джгут	3,0	600	1,95

Вартість вуглецевих волокон з поліакрилонітрилу досить висока. Так, вартість високоміцних ПАН-вуглеволокон досягає $50 \div 200$ \$/кг, а високомодульних 400 \$/кг і вище.

Зараз велике значення надається одержанню вуглецевих волокон з нафтового і кам'яновугільних пеків. Вартість волокон з пеків коливається в межах $10 \div 125$ \$/кг. Піонерами в напрямку одержання вуглецевих волокон з пеків є Японська фірма "Куреха", що розробила технологію одержання вуглецевих волокон з ізотропних пеків, і американська фірма "Юніон Карбайд", яка використовує для цієї мети мезофазні пеки.

Одержання волокна з пеків складається із таких стадій: підготовка пеку, формування пекового волокна, затвердження пекового волокна і його температурна обробка (карбонізація, графітизація).

Пекові волокна формують при температурі розтопу $100 \div 350$ °С. Для надання їм неплавкості їх окиснюють. Наприклад, проводять двостадійну обробку волокна: спочатку озонованим повітрям протягом трьох годин при температурі 70 °С, а потім повітрям протягом години при температурі 260 °С.

Карбонізацію пекових волокон проводять при температурах $1000 \div 2000$ °С, а графітизацію – при $2800 \div 3000$ С. В таблиці 7.17 наведені фізико-хімічні властивості вуглецевих волокон, що одержані з нафтових пеків.

7.4. Технологія виготовлення виробів з армованих пластиків

Армовані пластики належать до композиційних матеріалів, які відзначаються підвищеною міцністю, теплостійкістю і нижчою, ніж метали густиною, що обумовлює використання їх як конструкційних, високоекономічних матеріалів. Композиційним

матеріалам у зв'язку з цим приділяється велика увага, передбачається випереджаючі темпи розвитку їх виробництва і впровадження в народне господарство.

Армовані пластики складаються з неперервного (безмежно довгого у порівнянні з діаметром) волокнистого наповнювача (арматури), яка зв'язана полімерним зв'язним (матрицею). Армура надає міцності і штивності матеріалам, а зв'язне – монолітності і забезпечує рівномірність розподілу навантаження між волокнами.

Таблиця 7.17.

Марки і фізико-хімічні властивості вуглецевих волокон, які одержані з нафтових пеків

Найменування фірми	Марка волокна	Фізико-хімічні показники			
		Міцність при розтягу, ГПа	Відносне видовження, %	Модуль пружності, ГПа	Густина, г/см ³
Куреха	T-101 T	0,6	2,0	30	1,57
	T-201 S	0,6	2,1	30	1,65
	T-201 F	0,7	2,1	33	1,65
Юніон Карбайд	P-75	2,1	0,4	520	2,0
	P-100	2,4	0,3	690	2,2
	P-120	2,2	0,3	827	2,2

Меншого поширення набули вуглецеві волокна з полівінілхлориду, полівінілового спирту, феноло-формальдегідних смол і лігніну.

Як волокнистий наповнювач найчастіше використовують скловолокно. Останнім часом все ширше почали використовувати вуглецеві і борні волокна. Пластики на основі вуглецевих і борних волокон відзначаються підвищеною міцністю і термотривкістю.

Окрім того, широко використовуються волокна органічного походження – волокна з ароматичних поліамідів ("Kevlar"), поліестерні волокна, льняні, конопляні волокна тощо. Назва пластика походить, в основному, від назви волокна (склопластики, вуглецеві пластики тощо). Основні фізико-механічні властивості найпоширеніших волокон наведені в табл. 7.18.

Як зв'язне використовують епоксидні, епоксифенольні, епоксистерні, поліестерні, феноло-формальдегідні і кремнійорганічні реактивні смоли. До складу композиції зв'язного входить затверджувач – аміни, ангідриди, мономери тощо. Вміст зв'язного в пластику знаходиться в межах 33 ÷ 45 % мас.

На сучасному етапі розвитку науки і техніки набувають значення армовані пластики на основі термопластичних матриць, зокрема модифікованого ко-полімеру етилену з пропіленом, ко-полімерів метакрилової кислоти, гетероциклічних полімерів (наприклад полііміди). Але ці композити одержують на основі короткого, дискретного (обробленого) волокна.

Введення навіть дробленого скловолокна в термопласти в 2 ÷ 2,5 рази збільшує міцність на розтяг полімеру, в 2 ÷ 3 рази знижує коефіцієнт теплового розширення і в 4 ÷ 10 раз зменшує усадку при формуванні виробу. Слід зауважити, що при переробці наповнених скловолокном термопластів спостерігається великий знос обладнання.

Нині великого значення набувають композиційні матеріали на основі матриць із термотривких гетероциклічних полімерів – полісульфонів і поліарилатів, поліамідів тощо. Такі композити характеризуються поряд з високою міцністю підвищеною теплостійкістю.

7.4.1. Теоретичні основи зміцнення полімерів армуванням

Великий вплив на роботоздатність армованих пластиків має адгезія між зв'язним і волокном, а також напруження, які виникають на межі поділу зв'язне - волокно внаслідок усадки при затвердженні зв'язного.

Адгезію між матрицею і арматурою забезпечують апретуванням волокна – обробкою поверхні речовинами, які підвищують поверхневу енергію і спорідненість арматури до зв'язного.

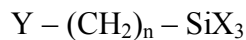
Таблиця 7.18.

Фізико-механічні властивості деяких волокон

Волокно	Діаметр d, мкм	Міцність на розтяг R_p , МПа	Видовження a, %	Модуль пружності, МПа·10 ⁻³
Скляне (елементарне)	5	1350	1,5 ÷ 3,5	70 ÷ 90
Карбонізоване вуглецеве (з ПАН)		2500	1,6	32 ÷ 70
Вуглецеві графітізовані (з целюлози)		900	1,0 ÷ 1,5	100 ÷ 170
Арамідні (“Кевлар”)		2000 ÷ 3000	1,9	120
Бавовняні	10 ÷ 28	300 ÷ 800	3 ÷ 10	0,58 ÷ 0,84

Апрети для скловолокна, наприклад, це органосиланові речовини, що силановою частиною орієнтовані до скляної поверхні, а алкокси-замісниками – до зв'язного.

Органосилани мають наступну загальну хімічну формулу:



де: $n = 1 \div 3$; X – група, яка здатна до гідролізу, наприклад Cl, $-C_2H_5$, $-OCH_3$ тощо; Y – група функційна, яка може реагувати з функційними групами полімеру матриці; для епоксидної смоли – це аміно чи етоксильна група. Можлива і фізична взаємодія, наприклад, утворення водневих зв'язків, електростатичне притягування полімерних груп, гідрофобної взаємодії.

Найрозповсюдженіші апрети для склопластику на основі епоксидної смоли – це γ -амінотриетоксисилан (А - 1100) або γ -гліцидооксипропілтриетоксисилан (А - 187). Апрет за рахунок груп X утворює фізичні (водневі) або хімічні зв'язки з вільними переважно гідроксильними, групами, які є на поверхні скловолокна, а групами Y – реагує з зв'язним, створюючи надійне “скріплення” зв'язного з волокном.

Разом з тим, потрібно зазначити, що на межі поділу поверхня волокна - зв'язне виникають внутрішні (небажані) напруження, які спричинені не однаковими коефіцієнтами теплового лінійного розширення матриці і арматури, та неминучою усадкою зв'язного при його затвердженні. Зв'язне при затвердженні може збігатись (стискатись) на 2 ÷ 15 %, а волокно при цьому не збігається. Тому полімер повинен би “ковзати” поверхнею волокна, що викликає появу в приповерхневому шарі зв'язного напруження. Явищу “ковзання”, безумовно, протидіє адгезія.

Напруження зменшують за допомогою зниження швидкості затвердження, в наслідок чого відбувається часткова релаксація напружень при конформації полімерних ланцюгів у ще неповністю сформованій просторовій сітці.

Механічні властивості армованих пластиків визначаються розміщенням волокон в матеріалі. Цей напрямок прийнято називати схемою армування (рис. 7.5).

Арматура може використовуватись у вигляді моноволокон, ниток, джгутів, плетива (тканин) з різною схемою плетіння (рис. 7.6)

При розтягуванні роль несучої основи армованих пластиків відіграють волокна арматури, а зв'язне визначає ступінь розподілу міцності. При стисканні відбувається зворотний процес. Тому на міцність впливає масове співвідношення арматури і матриці в об'ємі композиту.

Міцність на розтяг армованого композиту в напрямку паралельному до напрямку укладання волокна в загальному вигляді може бути записана наступною залежністю:

$$R_k = \sigma_n \cdot (1 - V_B) + R_B \cdot V_B, \quad (7.14)$$

де: R_k – міцність на розтяг композиту; R_B – міцність на розтяг волокна; σ_n – границя міцності на розтяг полімерної матриці; V_B – об'ємна частка волокна в композиті.

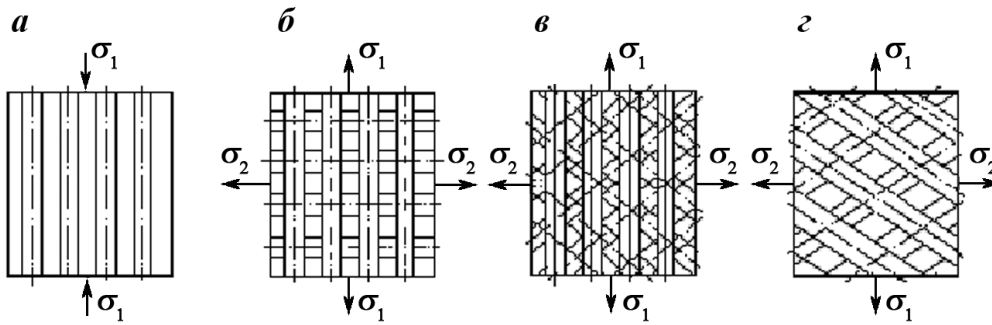


Рис. 7.5. Схема армування:

- а) максимальна стійкість до розтягу в напрямку $\sigma_{||}$; б) стійкість в двох напрямках $\sigma_{||}$ і σ_{\perp} ; в) максимальна міцність в діагональних напрямках; г) міцність приблизно однакова в усіх напрямках

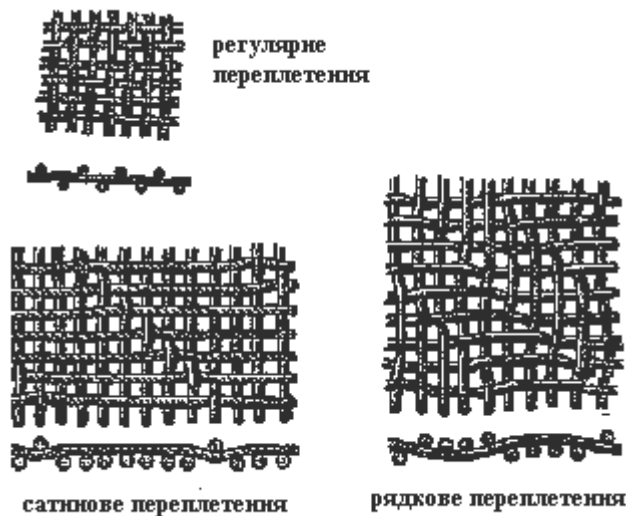


Рис 7.6. Види переплетінь склотканин (приклад)

Враховуючи цей факт, що міцність волокна є значно вищою ніж полімеру: модуль пружності, наприклад, волокон є значно вищий, ніж полімерів (див. табл. 5.1). То можна припустити, що міцність композиту буде зростати аж до 100 % вмісту волокна. Але ця залежність справедлива лише при певному значенні V_B – існує мінімальне значення V_B^{\min} до котрого міцність може дещо зменшуватись, а також – критичне максимальне значення V_B^{\max} (> 60 % об.) при якому спостерігається відчутний спад міцності. За технологічними ознаками оптимальним співвідношенням є таке, яке забезпечує повне покриття поверхні арматури зв'язним та неперервність об'єму матриці. Міцність композиту в перпендикулярному напрямку (до волокна) різко зменшується після 30 % вмісту волокна.

На міцність композиту впливає товщина волокна. Цю залежність можна прослідкувати з іншого виразу міцності, виведеного з урахуванням того, що і міцність і модуль пружності волокна є на декілька порядків більшим за модуль пружності полімерної матриці (табл. 7.19):

$$\sigma_n = K \cdot \sigma_B \cdot \frac{S_B}{S_K}, \quad (7.15)$$

де: σ_B – границя міцності на розтяг волокна; S_B і S_K – відповідно сумарна площа поперечного перерізу волокна і композиту; K – коефіцієнт, який враховує рівномірність розподілу волокна і дорівнює $0,5 \div 0,9$ (зростає із збільшенням d). Як бачимо, міцність композиту зростає із збільшенням S_B , яка параболічно змінюється із зменшенням діаметру (d).

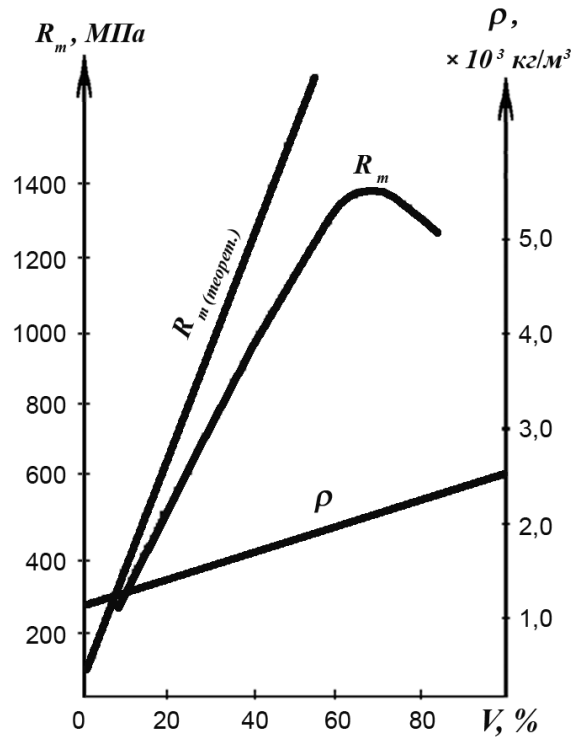


Рис. 7.7. Залежність міцності на розтяг (R_m) та густини (ρ) епоксидно-скляного композиту від об'ємної доли волокон

Міцність композиту в значній мірі залежить від температурних характеристик матриці, а саме – її теплостійкості. Міцність різко зменшується в температурному полі, яке перевищує температуру розм'якшення (теплостійкість) полімеру. Так, наприклад, для склопластику на основі епоксидного зв'язного і затвердженого поліетиленполіаміном (ПЕПА) спостерігається відчутне падіння міцності при нагріванні вище 40°C , хоча, як відомо, при такій температурі скло не зазнає жодних фізичних змін.

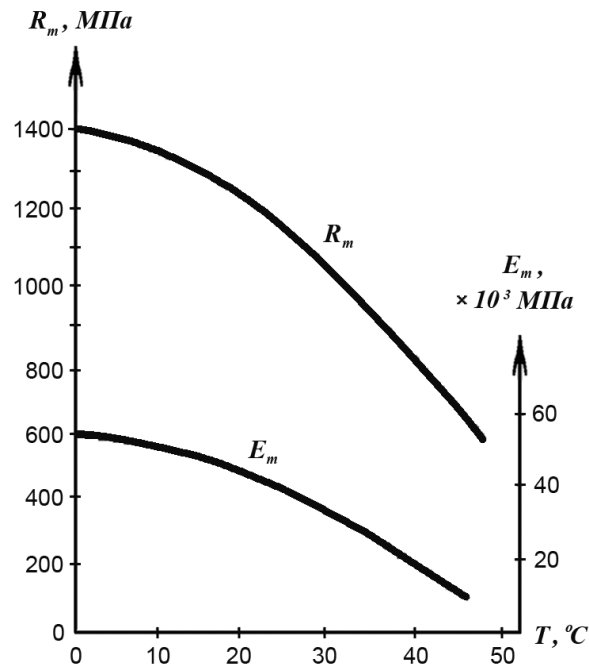


Рис. 7.8. Залежність міцності на розтяг (R_m) і модуля пружності (E_m) від температури середовища

На фізико-механічні властивості армованого пластику має суттєвий вплив на спосіб формування виробу та режим затвердження зв'язного (табл. 7.19).

Таблиця 7.19

Механічні властивості епоксидно-скляного пластику

Властивості	Затвердження при $T_{кімн}$	Додаткове затвердження 8 год при $T = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$
Міцність на розтяг, МПа	250	285
Міцність на згин, МПа	370	–
при $70\text{ }^{\circ}\text{C}$	55	339
Модуль при згинанні, МПа	17 600	22 800
при $70\text{ }^{\circ}\text{C}$	2 700	16 600

7.4.2. Методи формування виробів та стадії технологічного процесу переробки армованих пластиків

Процес виготовлення виробів можна умовно поділити на такі стадії:

1. Виготовлення арматури, яке полягає в одержанні волокна, наприклад, при протисканні розтопу скла через філь'єру, отримання пряжі з них (джгута чи полотна), апретування волокна.
2. Просочування арматури (полотна) смолою чи розчином смоли.
3. *Сушіння просоченої арматури.
4. *Набір пакета.
5. Формування виробу.
6. Затвердження зв'язного.

Стадії 3* і 4* залежно від методу можуть не проводитись.

Просочування здійснюють протягуванням волокна чи тканини через ванну з смолою відповідної концентрації, можливе змачування смолою профілю форми. Пізніше, залежно від методу формування, може проводитись сушіння (упарення розчинника) шляхом

протягування волокна через тунельну піч. Пакет набирають залежно від потрібної товщини виробу при допомозі складання просоченої тканини в шари, або ж набирають товщину стінки так, як описано в 7.4.3.1.

7.4.3. Основні методи формування виробів

7.4.3.1. Контактний метод

Це метод, при якому суміщається стадія просочування і формування у формі (рис. 7.9). Метод полягає в тому, що на поверхню форми, змащеної воском або іншим антиадгезивом, наносять шар смоли з затверджувачем і іншими технологічними доданками, потім накладають скляну тканину і притискають її до поверхні форми. Притискання до форми і ущільнення здійснюється валиком вручну або механічно.

Після набору шару відповідної товщини здійснюють затвердження в формі при нагріванні чи на повітрі без нагріву. Режим залежить від природи зв'язного і затверджувача. Товщина шару набирається з урахуванням усадки зв'язного.

Переваги контактного методу:

- дешевизна і простота формування;
- простота і дешевизна форми (форма може бути з металевого листа, дерева або гіпсу);
- можливість формування великогабаритних тонкостінних виробів.

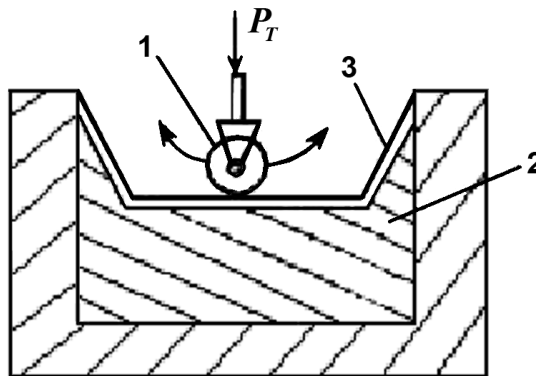


Рис. 7.9. Схема контактної форми

1 – формувальний шар композиту; 2 – форма; 3 – валик для ущільнення

Недоліки контактної форми:

- низькі фізико-механічні властивості (через низький тиск ущільнення – P_m бо, як правило, притискається вручну);
- неоднорідність пластику;
- гладка поверхня тільки з однієї сторони (з сторони форми);
- великі затрати ручної праці і висока шкідливість процесу через безпосередню роботу людини з смолою, що містить затверджувач, зокрема, амінного типу.

7.4.3.2. Вакуум-формування з еластичною діафрагмою

Технологічний процес складається з двох стадій:

1. набір пакета контактним способом;
2. створення розрідження під еластичною діафрагмою, яка внаслідок цього обтискає по поверхні композицію, одночасно, притискаючи її до поверхні форми. Композиція набуває форми виробу (рис. 7.10).

Для підвищення щільності укладання шарів в композиції над діафрагмою створюється тиск повітрям або паром (залежно від умов затвердження).

За даним методом формування отримують більш міцний виріб з гладкими поверхнями. Товщина попередньо набраного пакету закладається з урахуванням ущільнення під тиском.

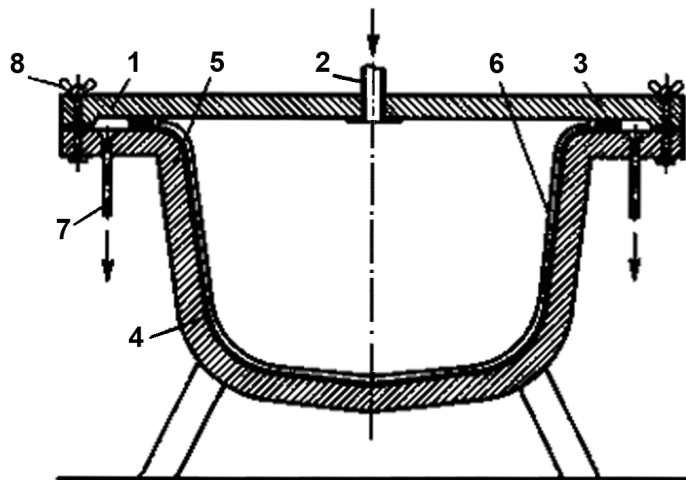


Рис. 7.10. Формування з еластичною діафрагмою

7.4.3.3. Метод пресування пружним або штивним пуансоном

Для пресування використовують оформлену заготовку (контактним методом) або набраний пакет просоченої склотканини з відповідною товщиною, дещо більшою, ніж товщина виробу (враховують ущільнення), рис. 7.11.

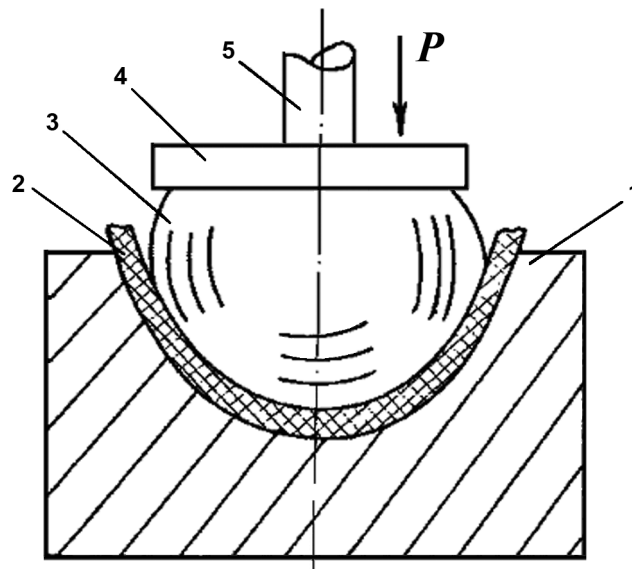


Рис. 7.11. Схема формування з використанням пружного пуансону:
1 – матриця; 2 – заготовка з просоченої зв'язним тканини; 3 – пуансон;
4 – верхня плита; 5 – плунжер

Пресування здійснюють в металевій формі на гідравлічних або пневматичних пресах. Використовують пуансон – гумовий або металевий. Тиск пресування перебуває в межах $0,2 \div 1,5$ МПа.

При такому методі отримують вироби з підвищеною в $10 \div 20$ раз міцністю у порівнянні з контактним формуванням.

7.4.3.4. Формування намотуванням

Цей спосіб полягає у тому, що отримують армовані вироби обертанням шаблону – сердечником, який обертається і слугує для формування внутрішньої поверхні виробу. При цьому використовують намотувальний пристрій, який забезпечує бажану схему армування, що дозволяє досягти максимальної міцності виробу в потрібних напрямках.

Існує дві різновидності методу формування намоткою: а) мокрий; б) сухий.

Мокрий метод полягає в намотці волокна чи тканини на шаблон, який повторює форму виробу з подальшим просочуванням одержаної арматурної заготовки зв'язним. Просочування зв'язним здійснюється шляхом втискання його в заготовку під тиском з подальшою опресовкою в ванні чи в формі. Опресовка може здійснюватись зсередини, за допомогою розрідження, ззовні і під дією відцентрової сили при ротаційному формуванні. Застосування спеціальних форм при опресуванні ззовні забезпечує отримання високоміцних великогабаритних виробів з високою точністю геометричних розмірів і мінімальну механічну обробку виробу.

Недоліки мокрого методу: висока забрудненість і шкідливість процесу; можливість використання смоли з вузьким діапазоном в'язкості.

Сухий метод полягає в тому, що скловолокно чи тканину, джгут просочують зв'язним, перед намоткою на шаблон, після чого проводять затвердження (рис. 7.12). Такий спосіб забезпечує високу культуру виробництва, можливість переробки зв'язних з різними технологічними властивостями (в тому числі твердих і високов'язких), можливість неперервного процесу формування.

Найбільш відповідальна операція процесу виробництва виробів шляхом намотки – намотка на оправку (шаблон), оскільки саме тут формується структура майбутнього матеріалу і його фізико-механічні властивості. Залежно від укладання волокна на оправку розрізняють окружне, спіральне, поздовжньо-поперечне і планетарне намотування.

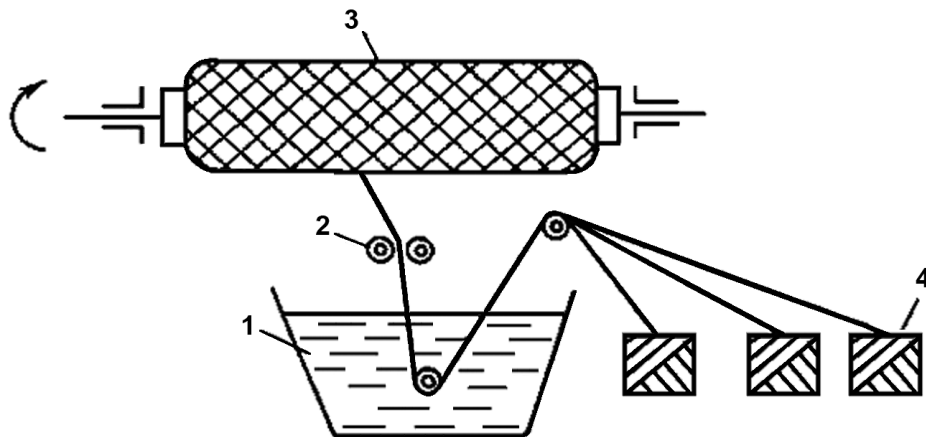


Рис. 7.12. Схема виготовлення виробів із склопластиків методом намотування:
1 – ванна зі зв'язним; 2 – віджимні валки; 3 – оправка; 4 – скляний джгут

Після намотування і досягнення необхідних геометричних параметрів виробу одержану заготовку переміщують на стадію затвердження.

Підвищення міцності виробу можна досягти, крім зміни схеми укладання, зміною натягування арматури чи при скручуванні ниток при намотуванні. Останнє особливо важливе при використанні зв'язного з низькими змочувальною здатністю і в'язкістю.

Окрім умов укладання арматури на властивості виробу впливає режим затвердження зв'язного – це температура і час затвердження, які, в першу чергу, залежать від типу смоли і складу композиції. Як правило, температура змінюється за ступеневим режимом (від кімнатної до встановленої вищої) з метою уникнення великих внутрішніх напружень при досягненні максимального ступеня затвердження.

Переробка склопластиків вимагає заходів з охорони праці: інтенсивна приточно-втяжна вентиляція, очищення повітря від мономерів, затверджувачів, розчинників (спалюванням чи регенерацією). Робота з скловолокном у фільтруючих масках та в захисному одязі.

8. ТЕХНОЛОГІЯ ВІДЛИВАННЯ (ЛИТТЯ БЕЗТИСНЕВЕ)

Відливанням називається процес переведення полімерного матеріалу при формування виробу з рідкого, пластичного чи, рідше, твердого стану полімеру або олігомеру у твердий стан без використання тиску, або ж під тиском, який загалом не перевищує 0,3 МПа у твердому гнізді форми при кімнатній температурі чи при підвищеній з наступним вийманням з форми виробу, який називається відливкою.

Відливання здійснюється з використанням відповідного обладнання для лиття без тиску або ж при використанні лише оснащення – форми з відповідним гніздом для оформлення виробу. Таким методом переробляються як термореактивні так і термопластичні полімери.

Метод цей на початку використовувався для формування невеликих серій або ж одинарних виробів, до яких не ставилися високі вимоги точності – це копії художніх виробів, навчальні пакети, стоматологічні вироби, ортопедичні протези, забавки тощо. Останнім часом метод відливання все частіше використовується для формування виробів технічного призначення, до яких ставляться підвищені експлуатаційні вимоги.

Метод відливання можна поділити на ряд різновидностей, а саме – відливання звичайне, виливання, заливання, а проф. Р.Сікора (Польща) до цього методу відносить і ротаційне формування.

8.1. Відливання звичайне. Формування виробів на основі епоксидних композицій

Для формування виробів за цим методом використовують композиції на основі термореактивних смол які знаходяться в рідкому або ж пластичному стані. Їх синтезують, як правило, перед використанням.

Одержання композицій полягає на механічному змішуванні, в основному, при відповідному співвідношенні і в певній черговості компонентів: полімеру, олігомеру чи, навіть, мономеру, затверджувача, розріджувача, наповнювача (перш за все порошкового), барвника, прискорювача (каталізатор або ж ініціатор і промотор) і інших необхідних додатків, залежно від типу полімеру, необхідних технологічних властивостей (в основному, плинність), а також структури і властивостей відливки після затвердження. Під час приготування композиції важливою є стадія дегазації суміші. Властивості виробу в значній мірі залежать від характеру заповнення гнізда форми і затвердження маси. На перебіг тих процесів можна вплинути, в основному, через:

- кінематику заповнення – форму-гніздо можна заповнювати: а) вливаючи безпосередньо у нього формувальну масу; при цьому відливання здійснюється без будь-якого тиску, а форма є відкритою (рис. 8.1); б) посередньо – заливання здійснюється через заливний канал і при цьому відбувається відливання під тиском, а форма замкнена (рис. 8.2);
- температуру форми: форма може мати кімнатну температуру, близьку до неї або ж підвищену – вищу за температуру маси на $120 \div 180$ °С;
- охолодження відливки – останню можна охолоджувати повільно разом з формою, або ж окремо (відливка вийнята з форми і вміщена у спеціальну камеру) чи ж прискорено – вийнята відливка охолоджується на повітрі.

Відливання без тиску використовується для формування виробів, в котрих одна сторона є у вигляді горизонтальної площини з сторони заливання.

Перетискання через ливниковий канал дозволяє отримати вироби, усі сторони котрих можуть мати різну (бажану) конфігурацію. Вважається, що при заповненні форми під тиском одержуються вироби кращої якості з підвищеними фізико-механічними властивостями. Разом з тим при такому методі виділяється в повітря менша кількість шкідливих речовин з реакційної маси і побічних продуктів реакції затвердження.

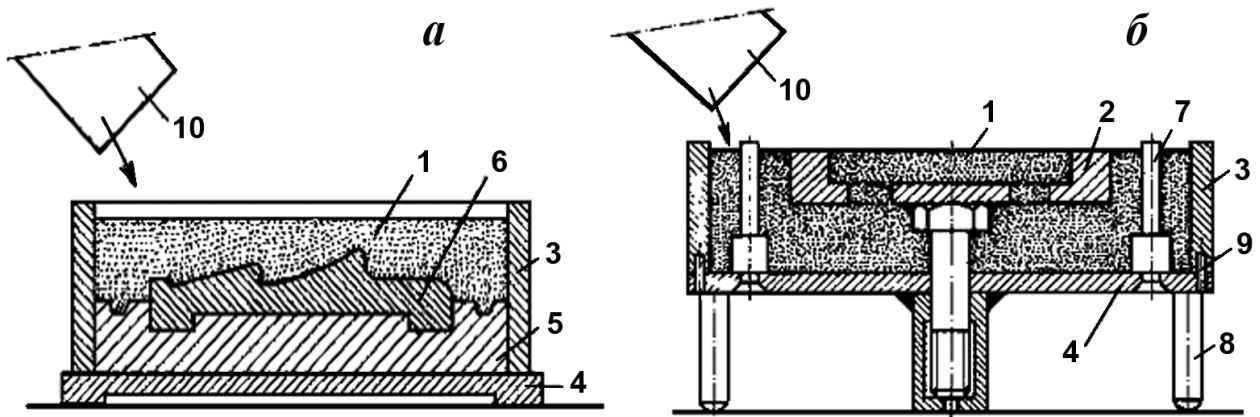


Рис. 8.1. Схема безпосереднього відливання у відкриту форму:

а) виріб однорідний; б) виріб з металевою арматурою;

1 – відливка; 2 – елемент який заливається; 3 – корпус форми; 4 – підкладка; 5 – матриця;
6 – шаблон; 7 – арматура; 8 – ніжки опору; 9 – центрувальні штифти;
10 – ємність з заливною композицією

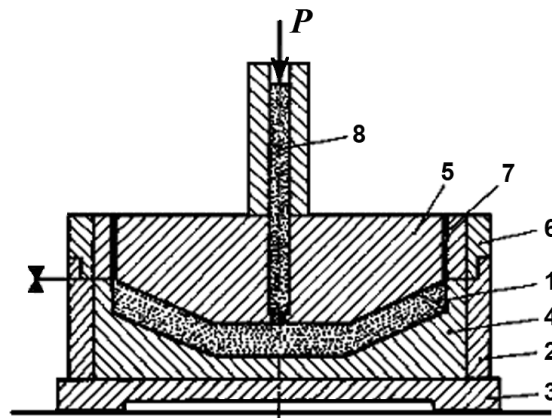


Рис. 8.2. Схема відливання з тиском через ливниковий канал у зімкнуту форму:

1 – відливка; 2 – корпус матриці; 3 – підкладка; 4 – матриця; 5 – пуансон; 6 – корпус пуансона;
7 – вентиляційні канали; 8 – ливниковий канал; тиск відливання: $P = 0,1 - 1,5 \text{ МПа}$

Реакція затвердження є екзотермічною. І коли форма не нагріта (не підігривається ззовні), то після заповнення гнізда форми процес затвердження відбувається з різною інтенсивністю – найбільшою в місці де найвища температура, а саме в середині об'єму, і все повільніше при наближенні до краю відливки. Коли ж форма підігривається, то внаслідок накладання теплових потоків швидкість затвердження найвища на краю відливки, яка контактує з гарячою стінкою форми.

Охолодження виробу розпочинається відразу після виймання його з форми чи при охолодженні її стінок, і швидкість цього процесу зменшується завжди з краю до середини. Все це впливає на структуру і властивості відливки. При формуванні у формах з підігриванням одержують вироби з нижчою концентрацією внутрішніх напружень, а отже з меншим ступенем деформування. Форма для відливання, як правило, одногніздна і їх виготовляють з металу, а для формування поодиноких малогабаритних виробів, можуть бути виготовлені з пластмаси, дерева чи навіть з глини або гіпсу (приклад виготовлення зубних протезів). Металеві елементи виробу (арматура) встановлюються у гнізді подібно до методу лиття під тиском чи пресування, а цікавою є їх фіксація – за допомогою магніту.

Формування малогабаритних і поодиноких виробів здійснюється без використання заливних машин і механічного устаткування.

Для виготовлення великих серій і великогабаритних виробів використовують заливні машини чи механізовану технологічну лінію. На рис. 8.3 зображено схему технологічної механізованої лінії для формування методом заливання під тиском серійного виробу – ізолятора на основі епоксиду.

Лінія складається з двох основних вузлів – вузла I для приготування реакційної маси і вузла II для відливання виробів.

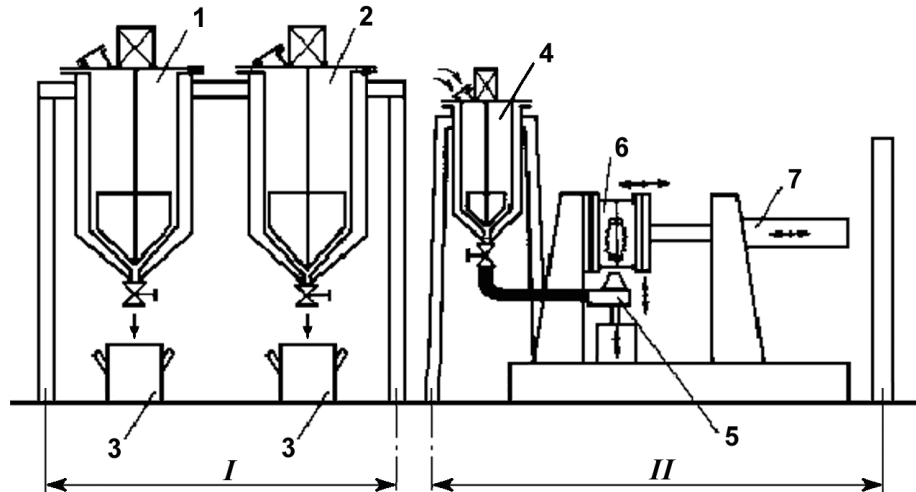


Рис. 8.3. Схема технологічної великосерійної установки відливання під тиском на прикладі виробництва епоксидних ізоляторів (пояснення в тексті)

Вузол I включає два вакуумні змішувачі (1) і (2) з можливістю нагрівання суміші до температури 150 °С для початкового змішування, а саме: епоксидної смоли ЕД-20 з кварцовим порошком і затверджувачем ангідридного типу (ВТМГ), а також кварцовим піском; ємності (3) для обидвох сумішей і вакуум-тисневий змішувач (4) для остаточного змішування при розрідженні $(3 \div 7) \cdot 10^2$ Па попередньо одержаних сумішей і для подавання маси під тиском 0,2 ÷ 0,3 МПа до вузла II. Цей вузол складається з дозатора (5), форми для відливання (6) і пристрою для запирання і розмикання форми (7).

На рис. 8.4. представлена схема технологічної лінії для безтисневого відливання виробів у трьох формах однакової конструкції.

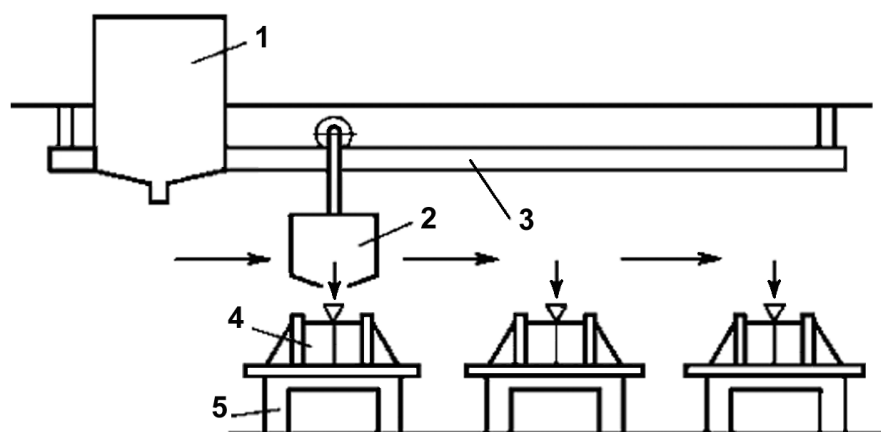


Рис. 8.4. Схема технологічної лінії відливання без тиску:
1 – збірник (чи збірники) смоли для відливання; 2 – дозатор; 3 – кран-балка; 4 – форма;
5 – підставка (стіл формувальний)

Особливе значення має метод відливання виробів з епоксидних смол (ЕС) при кімнатній температурі. В цьому методі цікавою з огляду на технологічний режим є

залежність часу від початку змішування смоли з затверджувачем і навколишньою температурою, кількістю смоли і затверджувача, типом і кількістю наповнювача.

Із зростанням температури зростає реакційна здатність незатвердженої маси – при умові, що температура смоли і затверджувача в момент змішування однакова і рівна температурі навколишнього середовища. Життєздатність маси можна збільшити, понизивши температуру зберігання її навіть нижче 0 °С.

Режим затвердження епоксидних композицій в першу чергу залежить від природи та кількості затверджувача. Як затверджувачі використовують різні первинні, вторинні, а також третинні ди- і поліаміни аліфатичної, аlicyclic чи ароматичної будови, низькомолекулярні поліаміди, похідні амінів, ангідриди ди- і тетракарбонових кислот. Затвердження також відбувається внаслідок полімеризації, викликані каталізаторами Фріделя-Крафтса (комплекс кислот Льюїса і третинних амінів, наприклад, BF_3 і триетиламін).

При використанні аліфатичних первинних амінів затвердження починається при поміркованій (кімнатній) температурі, але для досягнення оптимальних властивостей виробу в багатьох випадках необхідна наступна термообробка при 80 ÷ 120 °С протягом 3 ÷ 8 годин. Вторинні ароматичні аміни активні при підвищених температурах (70 ÷ 90 °С), а третинні викликають затвердження ЕС при нагріванні до 80 ÷ 120 °С.

У випадку використання для затвердження ЕС первинних амінів, необхідну кількість затверджувача розраховують з залежності:

$$X = \frac{E \cdot (M/n)}{43} \cdot K, \quad (8.1)$$

де: E – вміст епоксигруп в смолі, % (епоксидне число); M – молекулярна маса аміну (у випадку використання ПЕПА – $M/n = 20,6$ з розрахунку на ланку структури діетилентриаміну); n – кількість атомів водню у первинних і вторинних аміногрупах; $K = 1,2 \div 1,4$, залежить від природи аміну, як правило кількість аміну складає 8 ÷ 16 мас.ч. на 100 мас. ч. смоли.

Затвердження ангідридами кислот здійснюється у дві стадії. Перша стадія – нагрівання композиції до 120 ÷ 150 °С протягом 1 ÷ 5 год., а наступна стадія – витримка при температурі 180 ÷ 220 °С до 15 год. Для прискорення процесу і зменшення екзотермічного ефекту використовуються прискорювачі – тіоспирти, меркаптани, третинні аміни.

Полімеризація під дією каталізаторів Фріделя-Крафтса відбувається, як при понижених температурах (–5 °С), так і при нагріванні (до 200 °С) залежно від каталізатора.

Додавання затверджувача у кількості більшій ніж стехіометричній до ЕС приводить до підвищення реакційної здатності маси і викликає зменшення часу життєздатності смоли і збільшення кількості тепла, котре в свою чергу прискорює процес затвердження і втрати текучості.

Вплив співвідношення ЕС : затверджувач на життєздатність суміші і екзоэффект реакції затвердження ілюструють рис. 8.5. і 8.6., відповідно, при затверджувачах триетилентетрамін і поліаміноамід.

На життєздатність має також суттєвий вплив кількість і тип наповнювача (його технологічні характеристики). Наповнювач сприяє зменшенню кількості реакційного тепла, яке виділяється з одиниці об'єму смоли і покращує теплопередачу від реакційної маси до навколишнього середовища, але цей ефект залежить від природи наповнювача. Наприклад, наявність каоліну сприяє зменшенню тепловіддачі, натомість, додавання алюмінієвого порошку збільшує тепловіддачу. (рис. 8.7). На максимальну температуру реакційної маси впливає кількість епоксидної смоли. Максимальна температура реакції затвердження як і час життєздатності змінюються зі зміною кількості смоли (рис. 8.7). Температура зростає, а час

зменшується, що викликано зменшенням кількості тепла відданого на зовні з більшого об'єму внаслідок низької теплопровідності. Отже життєздатність пов'язана з внутрішньою температурою, яка впливає на реакційну здатність маси.

Треба зазначити, що затвердження смоли при відливанні може бути спричинено реакційним опроміненням (в основному, іонізаційним чи над-ультрафіолетовим). Такий метод називається радіаційним відливанням. Вироби, одержані при такому методі відзначаються рядом експлуатаційних переваг. До сьогоднішнього дня методами радіаційного відливання формують вироби з поліестерових смол.

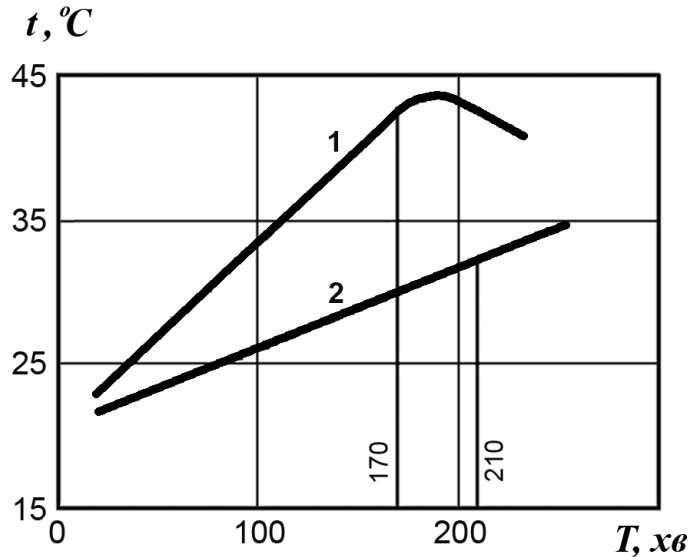


Рис. 8.5. Залежність температури t заливної маси від часу T затвердження:
1 – ЕД-20 : ПЕПА = 100 : 84, 2 – ЕД-20 : ПЕПА = 100 : 60, життєздатність, відповідно, 170 і 210 хв.

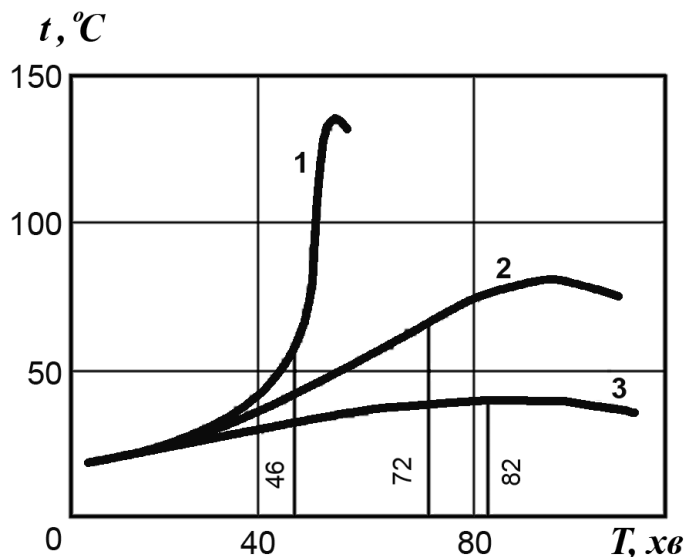


Рис. 8.6 Залежність температури t реакційної маси від часу T затвердження:
1, 2, 3 – ЕД-20 : ПЕПА = 10 : 1, життєздатність, відповідно, 46, 72, 82 хв;
2 – наповнювач каолін; 3 – наповнювач порошок алюмінію

Метод відливання використовується і для герметизації електронних елементів і схем. Герметизацію здійснюють у простих металевих чи пластмасових формах прямокутної чи циліндричної форми. В формі розміщується відцентровано електричний елемент і туди ж заливається приготована заливна маса. Після затвердження елемент покритий шаром

герметика виймається з форми. В більшості випадків герметизації герметик не повинен містити найменших пухирців повітря, тому його потрібно заливати під тиском, як це показано на рис. 8.8, або при допомозі складного обладнання з великим ступенем автоматизації і роботизації.

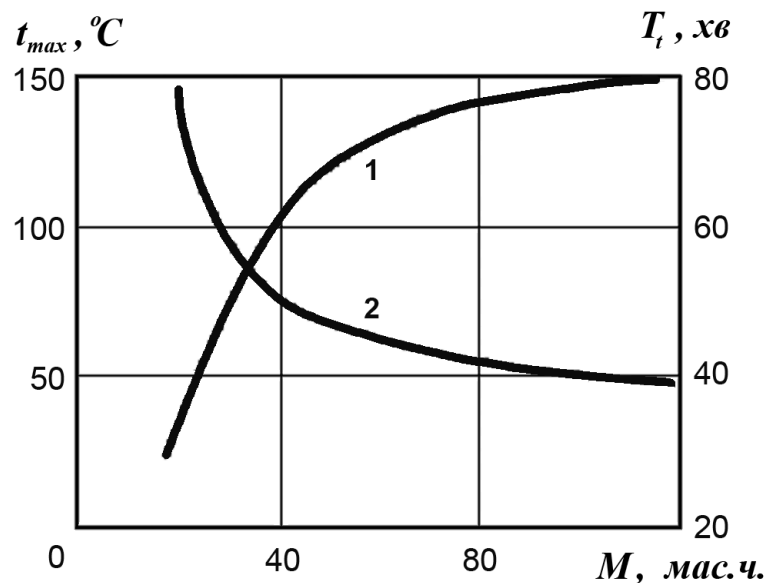


Рис. 8.7. Залежність максимальної температури t_{max} і життєздатності T_t смоли ЕД-20 з затверджувачем ПЕПА від кількості смоли

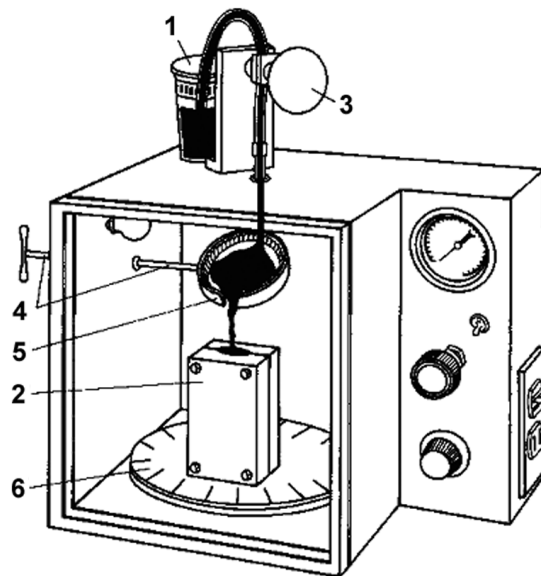


Рис. 8.8. Обладнання для відливання при розрідженні на прикладі формування герметизації: 1 – ємність з смолою; 2 – форма для відливання; 3 – вентиль; 4 – штанга для маніпулювання дозатором; 5 – дозатор; 6 – обертовий стіл з мітками

8.2. Формування виробів з композицій на основі ненасичених поліестерних смол

Затвердження композицій при відливанні здійснюють при кімнатній чи підвищеній температурі, залежно від типу реакційної системи, яка викликає реакцію полімеризації мономеру, що знаходиться у композиції.

Полімеризація відбувається в присутності звичайних пероксидних ініціаторів: пероксид бензоїлу, пероксид метилетилкетону і циклогексанону, гідропероксиду ізопропілбензолу у

кількості $2,5 \div 3$ % мас. Реакція характеризується високою екзотермією (рис. 8.9.), яка відчутно зростає з підвищенням температури затвердження (температури форми). Екзотермічний ефект в окремих випадках може призвести до саморозігрівання формувальної маси до температури 250 °С. Ця величина залежить від маси відливки. Внаслідок поганої теплопровідності смол ($\lambda = 0,42 \div 0,84$ кДж/м·град) виникають місцеві перегріву, що в свою чергу спричинює нерівномірність термічного розширення маси і виникнення внутрішніх напружень та розтріскування. Максимальна температура та імовірність розтріскування зростає зі збільшенням об'єму відливки. Тому до композиції вводять промотор, який сприяє пониженню ефективної температури ініціювання, а отже – і пониженню екзоэффекту. Промотор зменшує екзотермічний ефект посередньо через пониження температури затвердження, а безпосередньо зменшує у $2 \div 5$ рази час гелеутворення у смолі. Найбільш розповсюджений промотор – нафтенат кобальту (НК), розчинений у стиролі. При затвердженні у присутності НК екзоэффект відчутно зменшується (рис. 8.9.). Замість НК можуть бути використані третинні ароматичні аміни.

Для одержання монолітних бездефектних заготовок великої маси (більше декількох кілограм) з відсутністю внутрішніх напружень до композиції, яка містить пероксидний ініціатор ($0,5 \div 2$ % мас.) додають альдегіди чи кетони: фенілацетальдегід, дезоксобензоїн, тощо. В цьому випадку затвердження з малою екзотермією ведуть при $80 \div 120$ °С.

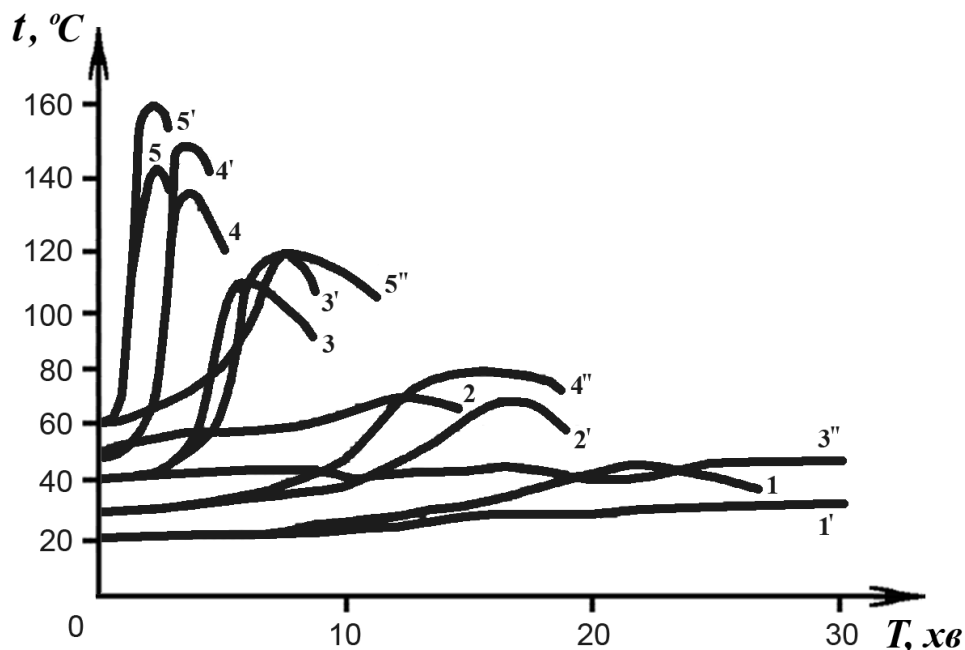


Рис. 8.9. Криві саморозігріву смоли ПН-1 при затвердженні в присутності різних ініціюючих систем:

- 1 - 5 – 3 мас.ч 50%-ної пасти пероксиду циклогексанону + 8 мас.ч. прискорювача НК;
- 1' - 5' – 3 мас.ч. 50%-ного розчину пероксиду метилетилкетону + 3 мас.ч. прискорювача НК;
- 3'' - 5'' – 3 мас.ч гіперизу + 8 мас.ч. прискорювача НК.

Температура бані: 1, 1' – 20 °С; 2, 2' – 30 °С; 3, 3', 3'' – 40 °С; 4, 4', 4'' – 50 °С; 5, 5', 5'' – 60 °С

Зменшення екзотермії спостерігається при використанні пероксиду циклогексанону в суміші з аскорбіною кислотою.

При заливанні медичних і біологічних препаратів, деталей радіоелектронного обладнання, виготовлення кабельних муфт, заготовок для гудзиків використовують систему пероксид – третинний амін (наприклад, метилфеніланілін) і затвердження у формі без тиску ведуть за ступеневим режимом – перша стадія при кімнатній температурі, потім нагрівання і витримка на другій стадії при $45 \div 50$ °С, а потім – витримка при $100 \div 120$ °С. Якщо ж

вироби одержують тільки при кімнатній температурі, то через добу після їх виготовлення здійснюють термообробку при $80 \div 120$ °C протягом $3 \div 10$ годин.

Для зменшення екзотермічного ефекту рекомендується сповільнювати реакцію затвердження, регулюючи кількість ініціатора та промотору, додаючи інгібітори та регулятори росту, підвищуючи теплопровідність маси додаванням наповнювачів з високим коефіцієнтом теплопровідності.

При заливанні медичних препаратів і при виготовленні виробів великої товщини і маси формування ведуть пошарово – кожна наступна порція композиції заливається після стадії гелеутворення у попередній. При такому методі зменшується імовірність розтріскування матеріалу.

Аналогічний метод пошарового формування використовують при формуванні півфабрикатних поліестерних листів при виготовленні гудзиків. Найбільш розповсюджений метод виготовлення листових заготовок – це відцентрове лиття. Композицію, яка містить смолу ПН-12, ініціатор, промотор, барвник і інші доданки заливають у вертикально розміщений барабан центрифуги (вісь горизонтальна) діаметром $40 \div 50$ см і шириною $40 \div 60$ см. Затвердження ведуть при обертанні барабану з швидкістю $90 \div 150$ об/хв.

Відомо, що об'ємна збіжність (усадка) при затвердженні поліестерних смол становить $6 \div 9$ %. Тому для зменшення усадки і досягнення більшої прецизійності розмірів виробів до композиції додають тонкодисперсні порошкові наповнювачі, котрі, окрім цього, зменшують екзотермію і надають виробам специфічних властивостей – вогнестійкість, теплопровідність, струмопровідність тощо. При цьому процес відливання і режим затвердження мало відрізняється від процесу формування з ненаповнених композицій. Хоча затвердження наповнених смол проводиться, як правило, при підвищеній температурі внаслідок пониженої екзотермії.

8.3. Методи полімеризаційного формування виробів з термопластів

Для полімеризаційного формування характерний перебіг одночасно двох процесів – процес полімеризації і утворення полімеру з мономерів та додаткових речовин і фізичний процес формування готових до використання виробів, які можуть бути монолітні чи пористі. Зустрічається деколи суперечливий термін “реактивного лиття”.

Метод цей знайшов практичне використання при формуванні виробів з поліамідів, поліуретанів і поліметилметакрилату.

8.3.1. Формування полімеризаційне з поліуретанів

Поліуретани одержують при ступеневій чи міграційній полімеризації при взаємодії діізоціанатів (чи поліізоціанатів) з багатоатомними спиртами (поліолами) в присутності каталізаторів згідно з наступною реакцією:

Якщо обидва компоненти є дифункційні то утворюється лінійний поліуретан, властивості якого залежать від будови радикалів R і R₁; натомість, при використанні хоча б одного з компонентів, трифункційного (чи поліфункційного), утворюється структурований (сітчастий) поліуретан.

Щоб отримати спінений полімер, потрібно викликати утворення газу при полімеризації. Це можна здійснити двома наступними способами:

1. за допомогою взаємодії ізоціанату з водою, яка попередньо додана до поліолу;

Цей спосіб не набув широкого використання з огляду на недостатні механічні і теплофізичні властивості пінополіуретану.

2. фізичний спосіб – за рахунок випаровування легкокиплячих (летких) рідин, наприклад, фреону-11 (CFCl_3). Парування викликане теплом полімеризації ($Q = 200 \text{ Дж/г}$).

Вихідна сировина для одержання пінополіуретану є сумішшю в відповідних пропорціях наступних складових:

- а) основні компоненти поліюли з молекулярною масою $500 \div 900$ і функційністю $3 \div 8$ (в основному, поліестери чи поліетери);
- б) ізоціанати з двома і більше функційними групами (наприклад, 2,4-толуїлендіізоціанат або 4,4'-діізоціанатдифенілолметан);
- в) додаткових компонентів:
 - сполук – регуляторів швидкості полімеризації, найчастіше тризаміщені аміни або оловоорганічні сполуки (час полімеризації від декількох секунд до декількох хвилин);
 - стабілізаторів поверхневого натягу, для регулювання розмірів пор, їх рівномірності, а також для впливання на структуру пор (відкриті чи закриті) – це, найчастіше, поліалкіленсілоксанові рідини;
 - емульгатори які запобігають фазовому розділенню суміші;
 - порофори – в основному, фреон-11 чи фреон-12 (проводяться дослідження на заміну цих порофорів);
 - еластифікаторів – подовжувачів ланцюгів – переважно 1,4-бутиленгліколю чи 3,3-діхлор-4,4'-ді(амінофеніл)метану;
 - інші доданки, наприклад, сповільнювачі горіння, барвники, розчинники, тощо.

Залежно від природи основних компонентів, доданків, їх співвідношення при проведенні реакції одержують полімери еластичні, напівжорсткі і жорсткі, термопластичні або ж зшиті (затверджені).

Процес одержання поліуретану складається з наступних стадій: попереднього змішування окремих складників, зберігання, дозування, змішування основного і заповнення гнізда форми або ж простору, який не є гніздом форми. При попередньому змішуванні одержують компонент А – суміш поліюлу з доданками; компонент В є відповідним ізоціанатом, який змішується з А при основному змішуванні. Обидва компоненти зберігають у робочих збірниках протягом певного (визначеного) часу при встановленій температурі ($22 \div 25 \text{ }^\circ\text{C}$). Із збірників компоненти А і В подаються на дозатори, за допомогою котрих відбирають дози, які забезпечують стехіометричне співвідношення основних реагентів. Рідини перетискаються під тиском у дозатори, а з дозаторів на лопатевий змішувач за рахунок надлишкового тиску за допомогою pomp зубчастих, поршневих, багатопоршневих чи радіальних. Основне (технологічне) змішування має дуже важливе значення. Одержану реакційну масу під тиском подають у форми, де внаслідок швидкої міграційної полімеризації утворюється готовий виріб – монолітний чи спінений (поролон).

Вважається, що біля 90 % виробів з ПУ – це поролони, з яких 1/2 становлять еластичні, а 1/3 – жорсткі. Отже процес спінення має винятково велике значення. В цьому процесі можна виділити декілька важливих характерних стадій:

- а) стадія скрита, котра триває від часу змішування до моменту збільшення об'єму суміші;
- б) стадія зростання, яка продовжується до моменту остаточного заповнення усього вільного об'єму форми де відбувається процес екзотермічної полімеризації, при якій утворений фізичний і реактивний газ спінює ще не затверджену пластичну масу.
- в) стадія дозрівання піни, при якій відбуваються остаточні процеси хімічні і фізичні структурування і формування поролону з необхідними властивостями – це стадія триває від декількох до десятків годин.

Формування виробів з ПУ може відбуватися за допомогою різних схем. Найважливіші технологічні схеми наступні.

Схема RIM (анг.: Reaction Injection Molding) полягає на неперервному одержанню суміші, котра виходить зі змішувальної головки під тиском $3 \div 25$ МПа і попадає у гнізда замкнутих форм, де відформовується кінцевий остаточний виріб (рис. 8.10). Головка може бути відділена від форми або ж може бути закріплена на кожній формі. В'язкість суміші становить $0,5 \div 1,5$ Па·с, що у $100 \div 2000$ раз менше, ніж в'язкість розтопів полімерів під час лиття під тиском.

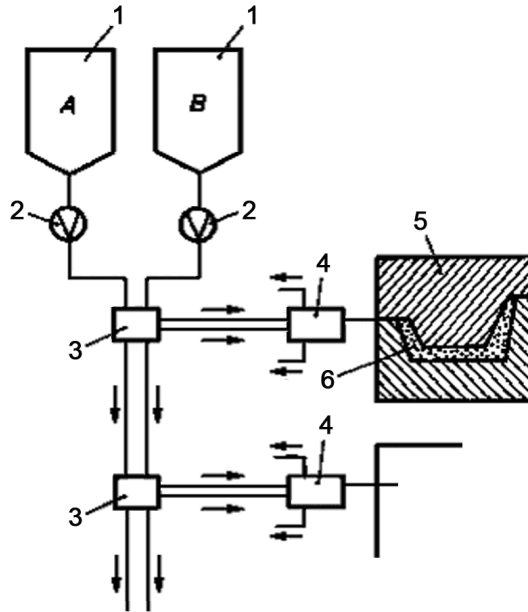


Рис. 8.10. Схема технології RIM:

- 1 – збірники приготованих попередньо компонентів А і В; 2 – дозатори;
3 – розподільчий пристрій; 4 – змішувач компонентів А і В (комірково-інжекційна головка);
5 – форма; 6 – відформований предмет з ПУ (суцільний або спінений)

Час формування від 30 с до 1 хв. Тиск у формі не перевищує 0,35 МПа, а отже зусилля запирання форми виносить $1 \div 2$ % зусилля запирання форми при литті під тиском (табл. 8.1).

Таблиця 8.1.

Зусилля запирання форми в технології RIM та при литті під тиском

Площа перерізу проекції відливки і каналів в площині розмикання	Зусилля запирання, МПа	
	RIM	Лиття під тиском сумішей термопластів
0,03	0,02	1,47
0,07	0,05	2,94
0,13	0,10	5,88
0,26	0,20	11,77
0,52	0,40	23,54
0,97	0,74	44,15

Низький тиск у формі обумовлює малу усадку і зменшує внутрішні напруження у виробі. Процес формування здійснюється на гідравлічних пресах з зусиллям 1,5 МН, оснащених столом спеціальної конструкції, наприклад з ухилом до $\pi/4$ рад, що дозволяє виймати вироби з гнізда форми. За допомогою технології RIM виготовляються вироби конструкційні і елементи облицювання автомобілів (рис. 8.11).

Технологія RRIM (анг.: Reinforced Reaction Injection Molding) відрізняється від RIM тим, що до реакційної суміші додається наповнювач у вигляді короткого скляного волокна у кількості до 40 % об. Волокно після подрібнення змішується попередньо з компонентом А чи

в окремих змішувачах. Волокно спричинює зношування обладнання. У зв'язку з цим, а також враховуючи підвищену в'язкість наповненої суміші для перетискання її у дозатори використовуються помпи мембранного типу, а в заливних головках часто створюють циркуляційну течію. Елементи обладнання, котрі найбільше піддаються стиранню виконують з карбїду вольфраму чи з кераміки.

Технологія SRIM (анг.: Structural RIM) відрізняється від RRIM тим, що для формування використовується наповнювач у вигляді листів, які називають преформами. Преформи відповідають формі виробу і їх виготовляють пресуванням з ламінованих листів. Преформу укладають в гніздо форми для формування виробу з ПУ і тоді виконують стадії аналогічно до технології RIM. Вміст преформи до всього матеріалу у виробі може перевищувати 50 %.

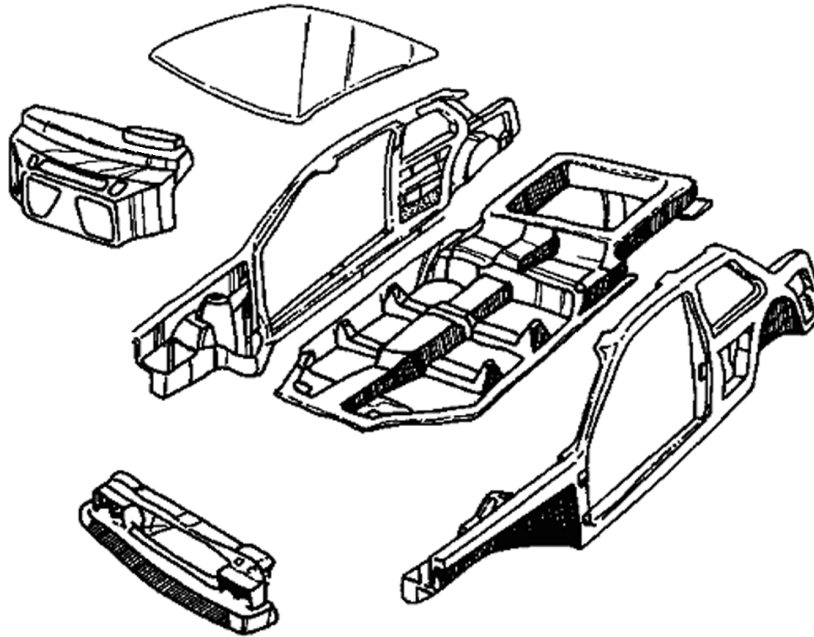


Рис. 8.11. Приклади виробів (деталі корпусу автомобіля) виготовлених технологією RIM або SRIM (згідно фірми Краус – Мафей, Німеччина)

Таким способом формують великогабаритні вироби складної конфігурації (розміри до 1,5 м) (див. рис. 8.11).

Технологія RI-RIM (анг.: Rotary Injection-RIM) полягає на неперервному одержанні суміші у змішувачі спеціальної конструкції (рис. 8.12.) і циклічним заповненням гнізда форми, де відбувається формування виробу. Компонент А подається через поздовжній канал валу мішалки, звідки через радіальні канали під дією відцентрової сили поступає у простір, де відбувається змішування компонент В подається відразу у змішувальний простір. Мішалка обертається з обертовою швидкістю $4 \div 17 \text{ c}^{-1}$. Дозування здійснюється за допомогою зубчастих pomp з продуктивністю $1,0 \div 3,5 \text{ хв}^{-1}$. Тиск суміші, яка витискається з змішувача становить $0,1 \div 1,0 \text{ МПа}$. До основних переваг цієї техніки треба зарахувати інтенсивне мішання з високою якістю, яка забезпечується великими напруженнями зсуву, що виникають у змішуваному просторі (щілині).

8.4. Технологічний процес формування виробів з поліуретанів

Технологічний процес полімеризаційного формування з поліуретанів може бути циклічним (періодичним) або ж неперервним. Здійснюється процес на технологічних лініях, котрі поділяються залежно від характеру процесу чи залежно від руху форми на стаціонарні і рухомі.

Технологічні лінії стаціонарні (рис. 8.13, а) для циклічного процесу складається з декількох або ж з великої кількості нерухомих форм і з відповідної кількості переносних головок зі змішувачами пристроями або ж головок, що вмонтовані в форми, до котрих під'єднується пристрій з сумішшю реактивних складників ПУ. Такий тип ліній використовується рідко. Більш розповсюджені рухомі лінії для періодичного процесу (рис. 8.13, б), котрі складаються з певної кількості рухомих форм і з однієї або декількох стаціонарних головок, під'єднаних до переміщуючого пристрою. З огляду на тип переміщення форми лінії поділяються на карусельні, поступально-обертові і інші.

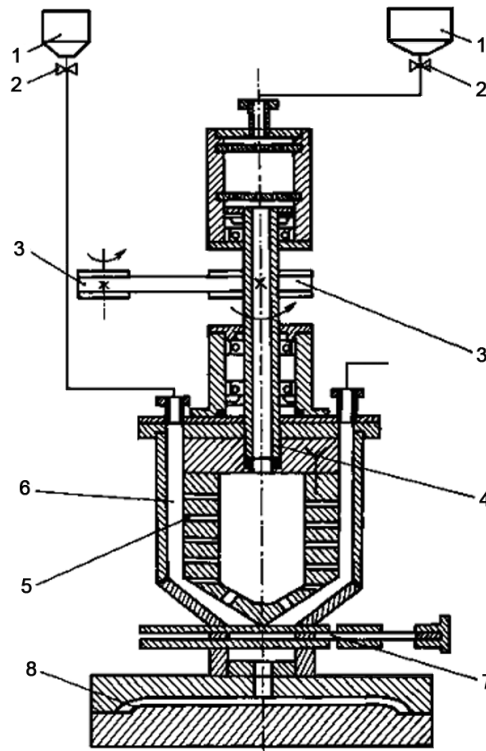


Рис. 8.12. Схема технології RI – RIM:

1 – збірники складників композиції; 2 – дозувальні помпи; 3 – привід мішалки;
4 – мішалка з поздовжніми і радіальними каналами; 5 – радіальні канали; 6 – щілина;
7 – спускна заслінка; 8 – гніздо форми

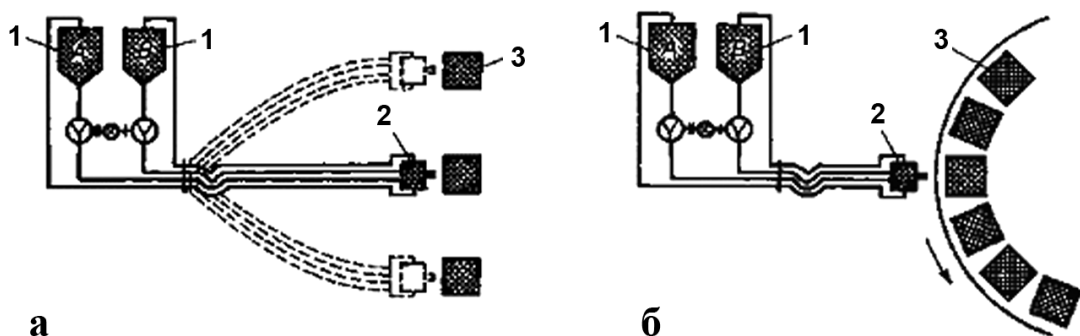


Рис. 8.13. Принципи дії технологічної лінії циклічного формування полімеризаційного пінополіуретану: а) стаціонарна; б) рухома;

1 – збірники складників А і В; 2 – змішувальна головка; 3 – форма

На рис. 8.14. зображено технологічну рухому лінію карусельного типу для полімеризаційного формування за технологією RIM, призначеного для виготовлення поролонівих автомобільних сидінь різних розмірів з регульованою стійкістю форми – це

технологія Краус-Мафей (Німеччина). На карусельній станині (1), яка виконує обертовий рух розміщено 16 форм (2), які закріплені на держаків з лінійно-обертовим рухом (3). За допомогою руху каруселі і допоміжного обертання держаків форми по чергово під'єднуються до двох головок з змішувачем (4), котрі працюють одночасно або ж по чергово. Цикл процесу технологічного займає обертання станини карусельної на кут $\pi/8$ рад., при цьому відбувається обертання форми на держаку і під'єднання її до головки та заповнення гнізда.

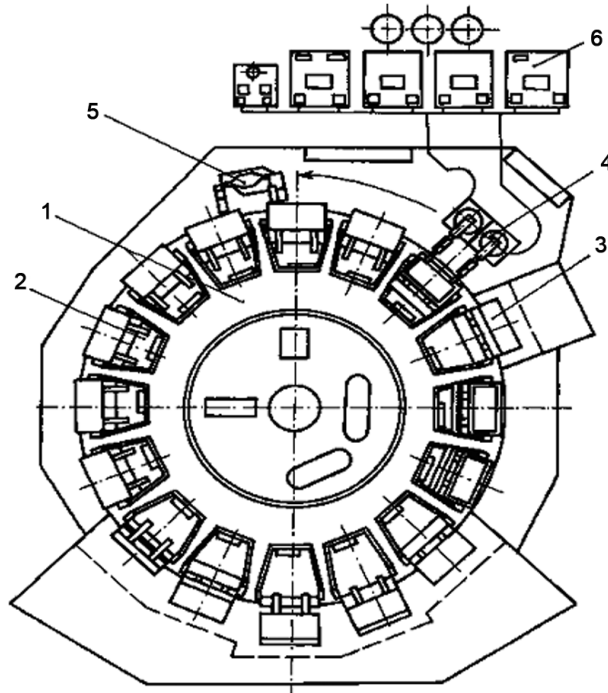


Рис. 8.14. Схема рухомої карусельної лінії для циклічного формування з пінополіуретану:
1 – транспортер; 2 – форми; 3 – транспортер лінійно-обертовий; 4 – змішувальна головка;
5 – привід транспортеру; 6 – дозувальні пристрої

Тривалість цього циклу складає 30 с. Лінія автоматизована двома роботами до головки і керована двома комп'ютерами. Регулювання твердості піни здійснюється за рахунок зміни кількості порофору. Карусельні лінії економічно вигідні тоді, коли їх діаметр не перевищує 16 м.

У випадку, коли підбір складників суміші є такий, що час полімеризації є довший, ніж час обертання при здійсненні циклу на карусельній установці, а при цьому ставиться вимога високої продуктивності процесу, використовують установки типу неперервної стрічки (поступально-обертові). На рис. 8.15. представлено схематичне зображення такої лінії.

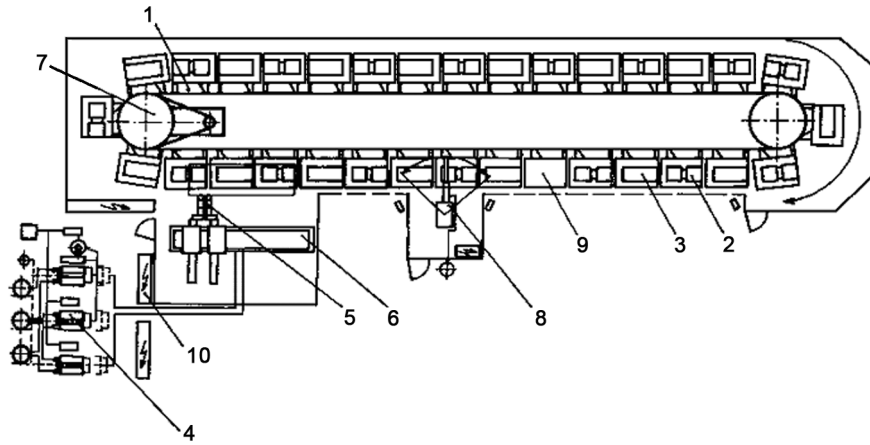


Рис. 8.15. Схема лінійно-обертової технологічної лінії для циклічного формування з ПУ:
 1 – транспортер ланцюговий; 2 – форми; 3 – транспортер обертовий; 4 – устаткування дозувальне з помпами; 5 – головки; 6 – робот для керування головкою; 7 – привід ланцюгового транспортеру; 8 – робот для напilenня антиадгезиву; 9 – візок форми; 10 – вузол керування

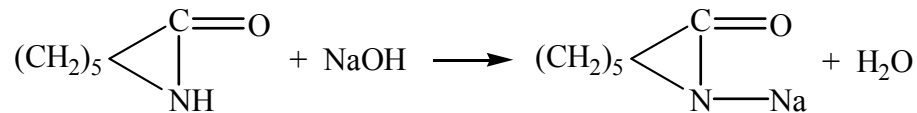
На конвеєрі ланцюгового типу (1), який виконує лінійний рух, знаходяться 30 форм (2), які закріплені на держаках, що обертаються. Пристрій заповнення форм сумішшю утворює три групи ємностей (4) і насосів з двома головками (5), а також робот (6) з дев'ятьма ступенями свободи для маніпулювання головками. Цикл процесу заповнення триває 7,5 с і включає переміщення конвеєру на віддаль від форми до форми, обертання форми на держаку, підведення головки і заповнення гнізда форми. Лінія автоматизована і комп'ютеризована.

Неперервна технологічна лінія складається з стрічкового конвеєру і головки зі змішувачем, яка виконує коливання перпендикулярні до переміщення стрічки. З головки суміш виливається на стрічку. Склад суміші підбирається такий, при котрому спінення наступає лише на віддалі 300 ÷ 600 мм від заливної головки. Для запобігання адгезії маси до конвеєру і її стікання з конвеєра, останній покривають роздільною плівкою або папером і його краї також закриваються плівкою. Після затвердження піни (на певній віддалі заливання) спінений матеріал у вигляді листа нарізується на аркуші чи стрічки, а відділена стрічка – підкладка звивається і повертається на початок процесу. Піноматеріал, одержаний за допомогою такого способу характеризується більш рівномірною пористістю.

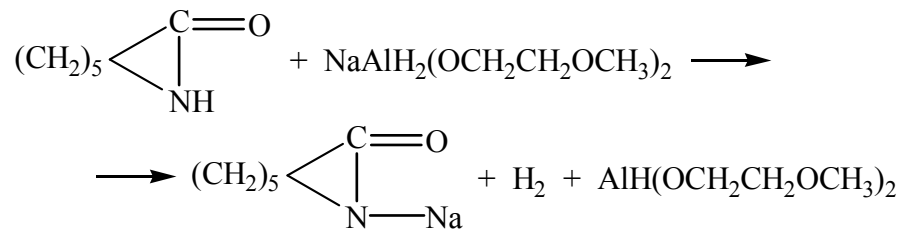
8.5. Формування полімеризаційне з поліаміду

З багатьох відомих полімеризаційних технологій формування з поліамідів найбільш znana є технологія аніонної полімеризації капролактаму з одержанням поліаміду 6. Час полімеризації чистого і сухого капролактаму в атмосфері інертного газу при температурі 200 ÷ 250 °С перевищує 600 годин. Отже обов'язково використовувати активатори і каталізатори полімеризації.

Аніонну полімеризацію успішно здійснюють в присутності гідроксиду натру (NaOH). На першій стадії після введення NaOH у розтоп капролактаму утворюється похідна капролактаму, котра є каталізатором полімеризації. Взаємодія ця записується наступною схемою реакції:



Недоліком цієї реакції є необхідність видалення з реакційної маси утвореної води, котра тут виступає інгібітором росту ланцюга. Замість гідроксиду можна використовувати дигідрид біс-(2-метоксиетокси) алюмо-натрію, котрий окрім високої реакційної здатності забирає домішки води. Його концентрація 0,035 % мас. по відношенню до капролактаму. Приймається, що взаємодія капролактаму з цим ініціатором відбувається за наступною схемою:



Але швидкість цієї реакції є меншою, ніж при використанні гідроксиду натру. Крім того, недоліком процесу є виділення водню. Тому більш технологічним є використання дикапролактаму біс-(2-метоксиетокси) алюмо-натру. В цьому випадку водень не виділяється.

Вихідна сировина для полімеризаційного формування є сумішшю компонентів наступного орієнтовного складу:

- капролактаму з пересічним вмістом води до 0,03 % мас.;
- ініціатора полімеризації (дигідрид біс-(α -метоксиетокси) алюмо-натру у вигляді 70-процентного розчину в толуолі, або ж дикапролактаму біс-(2-метоксиетокси) алюмо-натру у вигляді 80 %-ного розчину в толуолі);
- активатора полімеризації – однофункційного N-ацетилокапролактаму або ж дифункційного толуїлен 2,4- (діізоціанату);
- порофору – 1,6 гексаметилен діізоціанату або ж бензодіазоаміну (при спінюванні).

Використовуючи перші три складники одержуємо монолітні вироби, при додаванні порофору – спінені вироби.

Приклад технологічних умов при одержанні монолітних виробів на першій стадії: розтоп капролактаму нагрівають до 100 ± 5 °C і до нього додають дикапролактаму біс(2-метоксиетокси) алюмо-натру у кількості 0,3 % мас. по відношенню до капролактаму, потім суміш нагрівають до 140 ± 2 °C і додають 0,15 % мас. 2,4-толуїлен-діізоціанату.

Вироби спінені одержують з суміші, яка отримують змішуванням капролактаму з 0,65 % мас. дигідриду біс-(метоксиетокси) алюмо-натру, наступним нагріванням до 135 ± 5 °C і додаванням спочатку 2,4 толуїлен-діізоціанату у кількості 0,65 % мас., а потім – бензодіазоаміну у кількості 1 % мас. Можливості кількісного і якісного складу сумішей обмежені, тому обмежені можливості і асортименту виробів на основі ПА-6 у порівнянні з ПУ.

Процес полімеризаційного формування з ПА-6 полягає, у загальному, на тому, що у гніздо нагрітої до температури $170 \div 180$ °C вливається попередньо отримана реакційна суміш. В формі відбувається аніонна полімеризація з наступною кристалізацією полімеру. Після чого виріб охолоджується у визначеному режимі разом з формою. Термограма процесу приведена на рисунку 8.16.

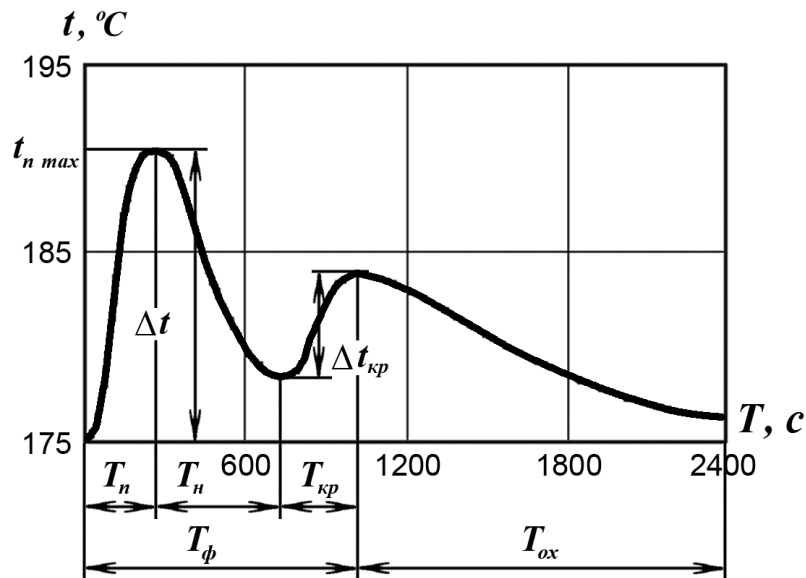


Рис. 8.16. Залежність температури t від часу T формування полімеризаційного ПА-6 (капролактам + дигідрид біс-(метоксиетокси)-алюмо-натру, який називають син гідрид і 2,4-толуїлендіізоціанату з назвою Ізоцин Т-80)

де: Δt_n – приріст температури за рахунок екзотермії полімеризації;

$\Delta t_{кр}$ – приріст температури від екзоэффекту кристалізації;

$\Delta t_{n \max}$ – максимальна температура полімеризації;

T_n – час полімеризації;

T_n – час нуклеації (зародкування);

$T_{кр}$ – час кристалізації;

$T_{ох}$ – час на охолодження;

T_{ϕ} – сумарний час процесу формування:

$$T_{\phi} = T_n + T_n + T_{кр}, \quad (8.2)$$

Тоді час циклу T_0 становить:

$$T_0 = T_{\phi} + T_{ох}, \quad (8.3)$$

Метод полімеризаційного формування з ПА знайшов застосування при формуванні великогабаритних товстостінних виробів, формування котрих з розтопу являє великі технологічні і конструкційні труднощі.

До специфіки методу слід віднести велику різницю температури в різних місцях виробу, в основному, при охолодженні за межами форми (рис.8.17), яка викликана малим коефіцієнтом теплопровідності полімери а також значний градієнт швидкості охолодження з усіма наслідками від цього.

У випадку приведенному на рис. 8.17. градієнт швидкості охолодження визначається згідно загальної залежності:

$$\text{grad}V_{ох} = \frac{V_{ох_2} - V_{ох_1}}{R}, \quad (8.4)$$

де: $V_{ох}$ – швидкість охолодження у місцях 1 і 2;

R – радіус габаритного виміру виробу (125 мм).

Т.Стежинський (Польща) встановив, що коли виріб охолоджувався у формі, то градієнт швидкості утримується в межах $0,0113 \div 0,0183$ К/(с·м), тоді коли при охолодженні у воді чи оліві він становить $0,1251 \div 0,3$ К/(с·м). Рекомендована швидкість охолодження становить $0,44 \div 0,57$ К/м.

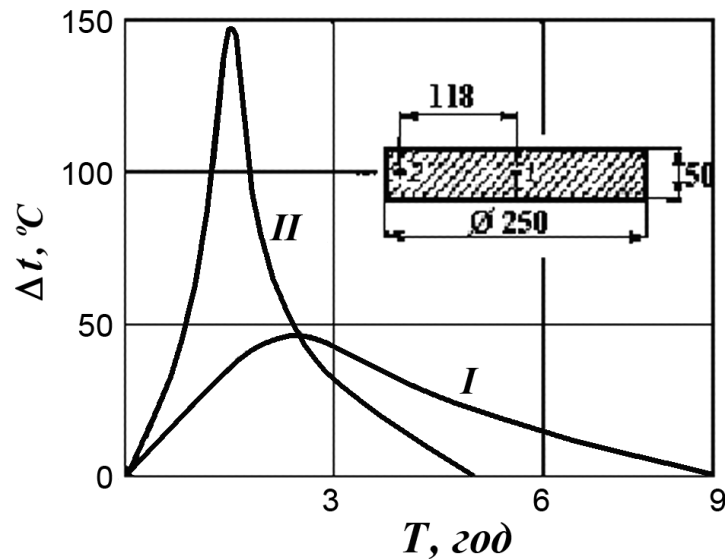


Рис. 8.17. Залежність градієнту температур Δt у відповідних місцях виробу (I і 2) від часу охолодження T при температурі форми 180°C :
I – охолодження в формі; II – охолодження після видалення з форми при температурі 60°C на повітрі з температурою 20°C

Процес спінення виробів ПА здійснюється у замкнутих формах з регульованою температурою (рис. 8.18.)

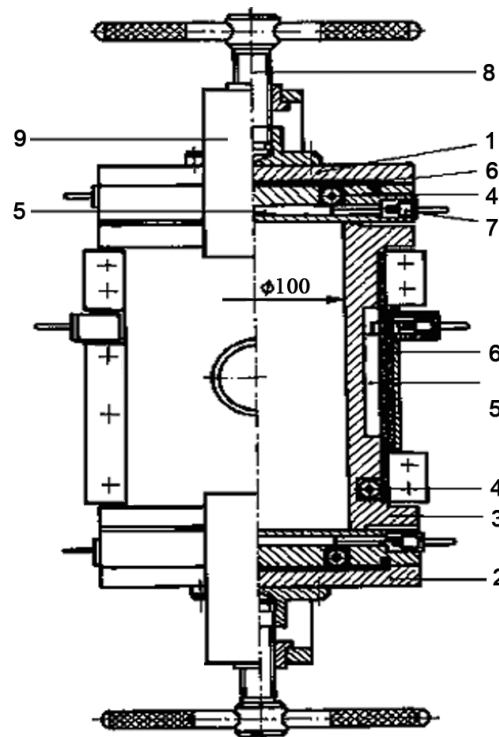


Рис. 8.18. Форма для спінення ПА – 6 під час аніонної полімеризації:
1 – кришка верхня; 2 – днище; 3 – лійка; 4 – електричний нагрівач; 5 – датчик температури; 6 – теплова ізоляція; 7 – електричне з'єднання; 8 – притискна гайка; 9 – обойма

Утворені піноматеріали мають відносну густину від 160 до 560 кг/м^3 .

Полімеризаційне формування з ПА-6 може здійснюватись за технологією RIM з використанням обладнання фірми Бадісне С. або Цінцінаті Майлакрон (США).

Отже, використовуючи спеціальне обладнання, яке дозволяє поєднати стадію одержання полімеру та стадії формування виробу в одному технологічному процесі можна за

прогресивною високопродуктивною технологією здійснювати виготовлення широкого асортименту виробів з ПУ і ПА із значно меншими витратами енергії, внаслідок низьких тисків при формуванні або чи при безтисневих методах формування.

Література

1. Липатов Ю.С. Будущее полимерных композиций. -Киев: Наук. думка, 1984. -135 с.
2. Пахаренко В.А., Зверлин В.Г., Кириенко Е.М. Наполненные термопласты. -Киев: Техніка, 1986. -182 с.
3. Грифор А. Технология экструзии пластмасс. -М.: Мир, 1965. -308 с.
4. Соколов А.Д., Швец М.М. Литье под давлением реактопластов. -Л.: Химия, 1989. -93 с.
5. Аким Э.Л. Синтетические полимеры в бумажной промышленности. -М.: Лесная промышленность, 1986. -248 с.
6. Альшиц И.Я. Проектирование деталей из пластмасс: Справочник. -М.: Машиностроение, 1977. -215 с.
7. Шаргородский А.М., Журкин Ю.М., Богданов В.В. Подготовка и смешение композиций / Под ред. В.А. Брагинского. -Л.: Химия, 1973. -79 с.
8. Шембель А.С., Антипина О.М. Сборник задач и проблемных ситуаций по технологии переработки пластмасс. -Л.: Химия, 1990. -272 с.
9. Бортников В.Г. Основы технологии переработки пластических масс: Учебное пособие для вузов. -Л.: Химия, 1983. -304 с.
10. Брагинский В.А. Технология прессования точных деталей из терморепактивных пластмасс. Основы расчета, оценки и регулирования точности. -Л.: Химия, 1971. -256 с.
11. Брагинский В.А. Точное литье изделий из пластмасс. -Л.: Химия, 1977. -112 с.
12. Брагинский В.А. Прессование. -Л.: Химия, 1979. -175 с.
13. Холмс-Уолкер В.А. Переработка полимерных материалов / Перевод с англ. под ред. М. Л. Фридмана. -М.: Химия, 1979. -304 с.
14. Лапшин В.В. Основы переработки термопластов литьем под давлением. -М.: Химия, 1974. -271 с.
15. Дедюхин В.Г., Ставров В.П. Прессованные стеклопластики. -М.: Химия, 1976. -272 с.
16. Гуль В.Е., Акутин М.С. Основы переработки пластмасс. -М.: Химия, 1985. -400 с.
17. Гуль В.Е., Дьяконова В.П. Физико-химические основы производства полимерных пленок. -М.: Высшая школа, 1978. -279 с.
18. Красовский В.Н. Переработка полимерных материалов на валковых машинах. -Л.: Химия, 1979. -123 с.
19. Ким В.С., Скачков В.В. Диспергирование и смешение в процессах производства и переработки пластмасс. -М.: Химия, 1988. -239 с.
20. Вторичное использование полимерных материалов / Под ред. Е.Г. Любешкиной. -М.: Химия, 1985. -192 с.
21. Липатов Ю.С. Межфазные явления в полимерах. -Киев: Наукова думка, 1980. -260 с.
22. Шалун Г.Б. Производство изделий из слоистых пластиков. -Л.: Химия, 1975. -95 с.
23. Виноградов Г.В., Малкин А.Я. Реология полимеров. -М.: Химия, 1977. -438 с.
24. Комаров Г.В. Способы соединения деталей из пластических масс. -М.: Химия, 1979. -286 с.
25. Рябинин Д.Д., Лукач Ю.Е. Смесительные машины для пластмасс и резиновых смесей. -М.: Машиностроение, 1972. -272 с.
26. Мак-Келви Д.М. Переработка полимеров. -М.: Химия, 1965. -442 с.
27. Терентьев И.С. Обработка пластмасс, применяемых в машиностроении. -Л.: Машиностроение, 1965. -219 с.
28. Канавец И.Ф. Определение технологических характеристик терморепактивных пластиков. -М.: ИТЭИ АН СССР, 1956. -87 с.
29. Каменев Е.И., Мясников Г.Д., Платонов М.П. Применение пластических масс: Справочник. -Л.: Химия, 1985. -448 с.

30. Москатов К.А. Термическая обработка пластмассовых и резиновых деталей машин. -М.: Машиностроение. 1976. -199 с.
31. Безкорвайный К.Г. Сварка изделий из пластмасс. -Л.: Химия, 1979. -121 с.
32. Кацнельсон М.Ю., Балаев Г.А. Пластические массы: Свойства и применение. Справочник. -Л.: Химия, 1978. -383 с.
33. Кулезнев В.Н. Смеси полимеров: (Структура и свойства). -М.: Химия, 1980. -303 с.
34. Кириллова Э.И., Шульгина Э.С. Старение и стабилизация термопластов. -М.: Химия, 1988. -240 с.
35. Стрельцов К.Н. Переработка термопластов методами механо пневмоформования. -Л.: Химия, 1981. -232 с.
36. Гуль В.Е. Структура и прочность полимеров. -М.: Химия, 1978. -327 с.
37. Калинин Э.Л., Калинин Э.И., Саковцева М.Б. Оборудование для литья под давлением: Расчет и конструирование. -М.: Машиностроение, 1985. -256 с.
38. Копин В.А., Макаров В.Л., Ростовцев А.М. Обработка изделий из пластмасс. -М.: Химия. 1988. -172 с.
39. Гуль В.Е., Кулезнев В.Н. Структура и механические свойства полимеров. -М.: Высшая школа, 1979. -352 с.
40. Красовский В.Н., Воскресенский А.М. Примеры и задачи по технологии переработки полимеров. -Минск: Вышэйш. шк., 1975. -320 с.
41. Кошкин Л.Н. Комплексная автоматизация производства на базе роторных линий. -М.: Машиностроение, 1972. -351 с.
42. Шерышев М.А. Формование полимерных листов и пленок / Под ред. В.А. Брагинского. -Л.: Химия, 1989. -119 с.
43. Шерышев М.А., Пылаев Б.А. Пневно- и вакуумформование. -Л.: Химия, 1975. -96 с.
44. Фридман М.Л. Технология переработки кристаллических полиолефинов. -М.: Химия, 1977. -398 с.
45. Сешко М.Ф., Баскаков И.Г., Дрожжин В.И., Кагер В.А. Механическая обработка пластмасс. -М.: Машиностроение, 1965. -131 с.
46. Наполнители для композиционных материалов / Перевод с англ. Под ред. Г.С. Каца и Д.В. Милевски. -М.: Химия, 1981. -734 с.
47. Басов Н.И., Брагинский В.А., Казанков Ю.В. Расчет и конструирование формующего инструмента для изготовления изделий из полимерных материалов. -М.: Химия, 1991. -349 с.
48. Новое в переработке полимеров / Под ред. З.А. Роговина и М.Л. Кербера. -М.: Мир, 1969. -285 с.
49. Переработка вспенивающихся термопластов. -Л.: Химия, 1979. -144 с.
50. Переработка пластмасс: Справочное пособие / Под ред. В.А. Брагинского. -Л.: Химия, 1985. -294 с.
51. Гекас С.И. Декоративная обработка изделий из пластмасс. -Л.: Химия, 1978. -121 с.
52. Сягаева С.И. Литье без давления. -Л.: Химия, 1978. -95 с.
53. Словарь-справочник по сварке и склеиванию пластмасс / Под ред. акад. Б.Е. Патона. -Киев: Наукова думка, 1988. -158 с.
54. Андреевская Г.Д. Высокопрочные ориентированные стеклопластики. -М.: Наука, 1966. -370 с.
55. Справочник по пластическим массам, т.2 / Под ред. М.И. Гарбара и др. -М.: Химия, 1969. -517 с.
56. Справочник по технологии изделий из пластмасс / Под ред. Г.В. Сагалаева и др. -М.: Химия, 2000. -424 с.

57. Суберляк О.В., Баштанник П.І., Технологія виробництва виробів із пластмас і композитів. Частина 1. -Київ: ІСДО, 1995. -164 с.
58. Суберляк О.В., Баштанник П.І., Технологія формування виробів з пластмас. Частина 2. Технологія формування погонажних виробів. -Київ: ІСДО, 1996. -84 с.
59. Тараканов О.Г. и др. Наполненные пенопласты. -М.: Химия, 1989. -215 с.
60. Фридман М.Л. Технология переработки кристаллических полиолефинов. -М.: Химия, 1977. -398 с.
61. Ханин М.В., Зайцев Г.П. изнашивание и разрушение полимерных композиционных материалов. -М.: Химия, 1990. -256 с.
62. Шалун Г.Б., Сурженко Е.М. Слоистые пластики. -Л.: Химия, 1978. -232 с.
63. Штарке Л. Использование промышленных и бытовых отходов пластмасс. -М.: Химия, 1987. -175 с.
64. Бернхард Э. Переработка термопластичных материалов. -М.: Госхимиздат, 1962. -747 с.
65. Калинин Э.Л., Саковцева М.Б. Свойства и переработка термопластов. -Л.: Химия, 1983. -287 с.
66. Калинин Э.Л., Саковцева М.Б. Выбор пластмасс для изготовления и эксплуатации изделий. -Л.: Химия, 1987. -413 с.
67. Осинковский Э.И., Суворов В.Д. Механическая обработка и отделка изделий из пластмасс. -Л.: Химия, 1976. -91 с.
68. Энциклопедия полимеров, Т.3. -М.: Советская энциклопедия, 1977. -1150 с.
69. Sikora R. Przetwórstwo tworzyw welkocząsteczkowych. -Warszawa, 1993. -528 p.
70. Koszkuł J. Materiały Polimerowe. -Cręstochowa, 1999. -174 p.
71. Липатов Ю.С., Керча Ю.Ю., Сергеева Л.М. Структура и свойства полиуретанов. -Киев: Наукова думка, 1970. -279 с.
72. Липатов Ю.С. Физико–химические основы наполнения полимеров. -М.:Химия, 1991. -259 с.
73. Экономика производства изделий из пластмасс. -М.: Химия, 1974. -295 с.
74. Пахаренко В.А., Яковлева Р.А., Пахаренко А.В. Переработка полимерных композиционных материалов. -Киев: Воля, 2006. -552 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК 1

Номограма для визначення часу витримки під тиском при пресуванні

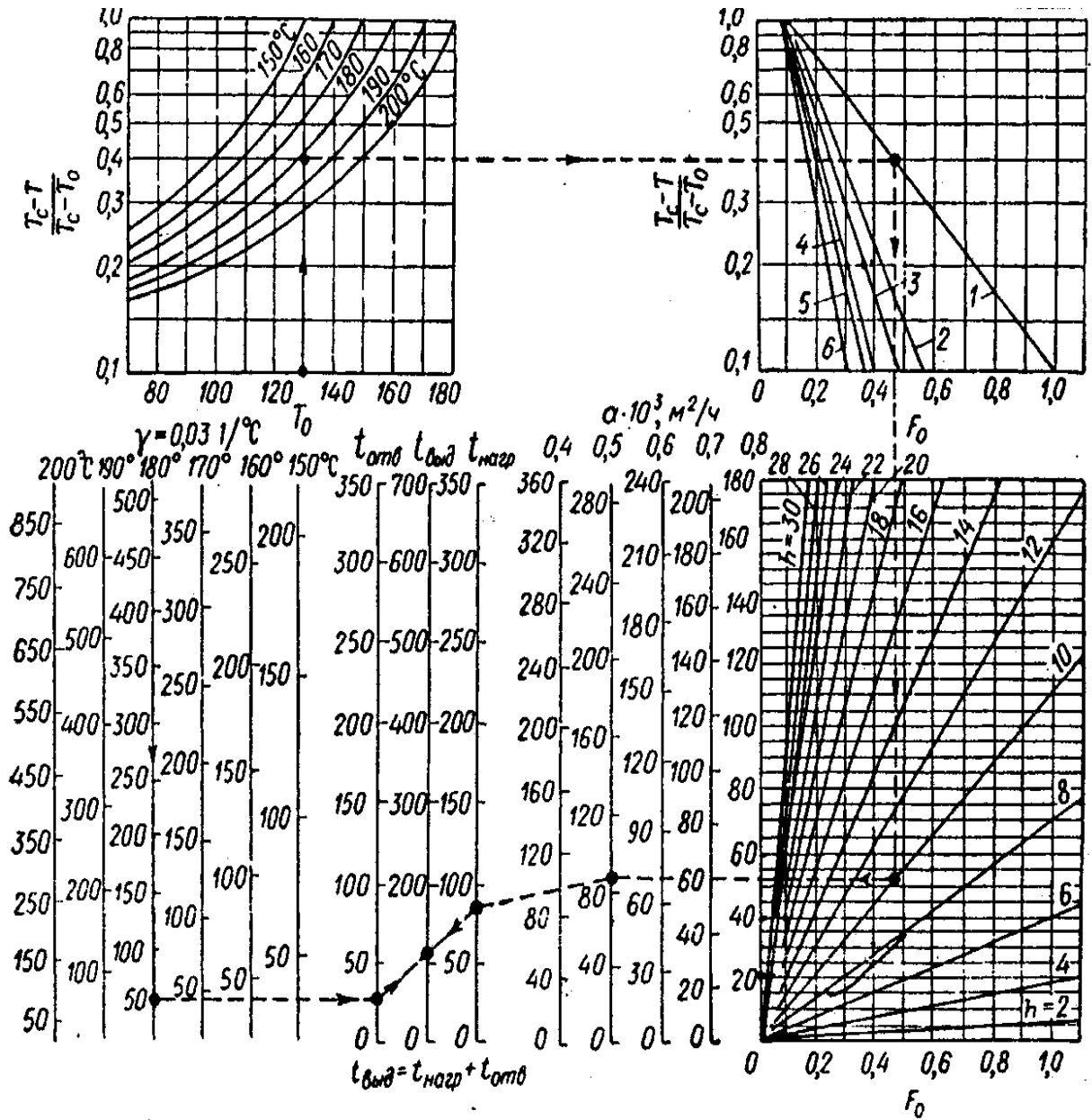


Рис. Д.1, б. Форма виробу: 1 – пластина; 2 – брусок; 3 – циліндр; 4 – куб; 5 – циліндр ($h = d$); 6 – куля; h – товщина стінки виробу

T_0 і T_c – температура відповідно попереднього підігріву і пресформи; T_{np} – температура пресування.

Рис. Д.1,а відображає вплив температурного градієнта на нагрів матеріалу в пресформі, рис.Д.1,б використовують для визначення критерію Фур'є. Користуючись рис.Д.1,а-в визначають час нагріву сировини до T_{np} . Знаючи цей час, коефіцієнт температуропровідності матеріалу і стандартний час затвердження, визначають час витримки (див. пунктирну лінію).

ДОДАТОК 2

Розрахунок питомого тиску пресування

Питомий тиск можна визначити за формулою:

$$P_{\text{пит}} = 56 \cdot 10 \frac{t_{\phi}}{21 \cdot \epsilon} \cdot X \frac{t_{\phi} \cdot 115}{122} \cdot \frac{S_p}{h_t} \cdot \frac{177}{t_{\phi}} \cdot 0,83 \cdot 10^{0,55+0,007 \cdot t_{\phi}}, \quad (1)$$

де: t_{ϕ} – температура форми, °C; S_p – робочий хід пуансона, см; h_t – висота таблетки, см; δ – товщина ґрату на виробі, мм (для початкових розрахунків прийняти $\delta = 0,15$); X – критерій конфігурації таблетки, см²:

$$X = h_T^2 \cdot \frac{d_T}{d_{np}}, \quad (2)$$

де: d_T – діаметр таблетки, см; d_{np} – граничне значення діаметра таблетки, ущільненої торцем пуансона, см.

ДОДАТОК 3

Характеристики деяких марок реактопластів необхідних для користування номограмою

Марки прес-матеріалу	Коефіцієнт температуро-провідності $a \cdot 10^{-3}$, м ² /хв	Температурний коефіцієнт, залежний від матеріалу, γ , 1/°C	Час затвердження матеріалу по пластометру при стандартному випробуванні $t'_{\text{омв}}$, с
ОЗ–010–02	0,4 ÷ 0,6	0,03	50 ÷ 80
К – 21 – 22	0,4 ÷ 0,6	0,025	120 ÷ 140
ФКП – 1	0,45 ÷ 0,5	–	90 ÷ 100
К – 214 – 2	0,4 ÷ 0,6	0,02	120 ÷ 160
К – 211 – 3	0,7 ÷ 0,9	–	200 ÷ 240
Волокніт	0,4 ÷ 0,44	–	50 ÷ 70
АГ – 4	0,7 ÷ 0,9	–	60 ÷ 80
Амінопласт	0,4	0,0028	80 ÷ 130
Мелаліт	0,5	0,032	180 ÷ 210

Примітка.

1. Коефіцієнт впливу попереднього підігріву $K = 0,85$ (фенопласти мелаліт); 0,9 (амінопласт).

2. Час нагріву зразка пластометра 19 с (фенопласти); 10 с (амінопласт, мелаліт).

ДОДАТОК 4

Стандартні режими пресування реактопластів

Матеріал	Температура пресування, °С		Тиск при пресуванні, МПа			Витримка (на 1 мм товщини виробу) при пресуванні		
	без попереднього підігріву	з попереднім підігрівом	компресійному		литтєвому	компресійному		литтєвому
			без попереднього підігріву	з попереднім підігрівом		без попереднього підігріву	з попереднім підігрівом	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Фенопласти:</i>								
02 -010 -02	–	–	30 ± 5		40 ÷ 60	0,6 ÷ 1,0	0,4 ÷ 0,8	0,4 ÷ 0,6
Сп3-342-02	180 ± 10	180 ± 10	30 ± 5	30 ± 5		0,3 ÷ 0,8	0,3 ÷ 0,7	–
Сп3-342-02	180 ± 10	180 ± 10	170 ± 10		60 ÷ 120	0,3 ÷ 0,8	0,3 ÷ 0,7	–
Е2 -330-02	170 ± 10	180 ± 10	35 ± 5	35 ± 5	60 ÷ 120	0,6 ÷ 1,0	0,4 ÷ 0,8	–
ВхІ-090 -34	160 ± 10	–	25 ÷ 40	–	50 ÷ 80	–	–	–
ЖІ-010-40	180 ± 10	–	30 ± 5	–	–	0,4 ÷ 0,5	–	–
<i>Амінопласти:</i>								
КФА1	140 ± 5	–	30 ± 5	–	–	1,0 ÷ 1,5	–	–
КФА2	140 ± 5	–	30 ± 5	–	–	1,0 ÷ 1,5	–	–
МФВ1	160 ± 5	(170 ± 5)	45 ± 5	–	60...100	1,5 ÷ 2,0	–	1,5
МФД1	160 ± 10	–	35 ± 5	–	–	1,0 ÷ 1,5	–	–
<i>Прес-матеріали на основі кремнійорганічних смол:</i>								
ПК - 9	150 ± 5	(160 ± 10)	40 ± 5	–	56 ± 5	2,0 ÷ 3,0	–	1,5 ÷ 2,0
КФ - 9	–	160 ± 10	–	30 ± 5	70 ± 80	–	1,0 ÷ 1,5	1,0
ВПМ - 3	–	(195 ± 5)	–	40 ± 5	80 ± 5	–	1,5 ÷ 2,5	1,7
<i>Матеріали пресувальні (скловолокніти):</i>								
АГ - 4С	160 ± 5	–	–	40 ± 5	–	1,5 ÷ 2,5	1,5 ÷ 2,5	–
АГ - 4ЛС	155 ± 5	–	25 ± 5	–	–	1,5 ÷ 2,5	–	–
АГ - 4В - 10	155 ± 5	–	35 ± 5	–	–	2,0 ÷ 3,0	–	–
СНК -2-27	145 ± 5	(150 ± 5)	30 ± 5	–	70 ± 120	1,0 ÷ 2,0	–	1,0 ÷ 1,5
ДСВ -2-Р-2М	145 ± 5	(135 ÷ 170)	25 ÷ 40	–	60 ± 130	1,5	–	1,0

* – В дужках вказана температура при литтєвому пресуванні.

ДОДАТОК 5

Причини виникнення і способи усунення найбільш поширених видів браку при пресуванні

Дефекти	Причини	Заходи усунення
Недопресовки: а) по верхньому краю виробу, форма змикається	Недостатня наважка. Віткання матеріалу між матрицею і пуансоном: а) висока текучість матеріалу; б) великий зазор між матрицею і пуансоном	Збільшити наважку. Замінити матеріал.
б) по всій поверхні виробу і форма не змикається	Висока температура попереднього підігріву Мала швидкість змикання форми. Висока швидкість затвердження. Охолодження таблеток після підігріву в генераторі.	Зменшити температуру попереднього підігріву. Збільшити швидкість змикання. Замінити матеріал.
в) в основному по верхньому краю виробу і форма не змикається	Засмічення напрямних втулок або опорних планок.	Прочистити форму.
г) по верхньому краю, на решті поверхні - здуття	Висока температура пресування.	Понизити температуру пресування.
д) у віддалених від центра частинах виробу	Недостатня текучість матеріалу Передчасне затвердження матеріалу: причини як і в 1 та 2 випадку "б" і "г".	Підвищити тиск пресування. Збільшити швидкість змикання форми. Замінити матеріал. Усувати відповідно до 1 та 2 випадку "б".
Матова поверхня а) по всій поверхні виробу	Низька температура пресування, матеріал погано затверджується. Недостатній час витримки під тиском. Мала температура попереднього підігріву.	Підвищити температуру. Збільшити час витримки під тиском. Підвищити температуру попереднього підігріву.
б) плями на одних і тих же місцях	Зношування хромованого покриття оформлюючих деталей.	Ремонт форми.
в) окремі плями розміщені випадково	Забруднення порожнини маслом і іншими речовинами. Забруднення матеріалу.	Замінити матеріал.
Здуття: а) великого розміру з товстою стінкою комірок, тріщини	Висока температура пресування. Недостатня витримка під тиском. Низька температура пресування.	Понизити температуру пресування. Подовжити витримку під тиском. Підвищити температуру пресування.
б) малого розміру з тонкою стінкою комірок	Підвищений вміст вологи і летких. Неправильно вибрано режим підпресовки.	Сушити чи замінити матеріал (при вмісті вологи і летких більше 5%). Використовувати відповідні підпресовки. Підібрати відповідний режим підпресовок.
Жолоблення	Велика різниця температур матриці і пуансона. Висока температура пресування. Недостатня витримка під тиском. Велика усадка матеріалу.	Перевірити і відрегулювати температуру. Понизити температуру. Подовжити витримку. Замінити матеріал. Зменшити температуру. Зменшити швидкість опускання. Подовжити витримку.
Товстий грат (напівзакрита форма) – велика переливка	Велика наважка матеріалу. Не змикаються опорні планки. Висока температура пресування. Недостатній тиск пресування. Мала текучість матеріалу.	Зменшити наважку, очистити форму. Зменшити температуру. Підвищити тиск пресування. Підвищити тиск або замінити матеріал.

ДОДАТОК 6

Деякі фізичні і технологічні параметри матеріалів, що використовуються при розрахунку систем термостатування

Матеріали	Густина, кг/м ³	Тепло- провідність, Вт/м·°С	Питома теплоємність, с·10 ⁻³ , Дж/кг·°С	Коефіцієнт температуро- провідності, а·10 ⁷ , м ² /с	Температурний коефіцієнт лінійного розширення, α·10 ³ , 1/°С	Температура форми при литті, °С	Температура розтопу в зоні сопла, °С
ПС блочний емульсійний	1030 ÷ 1070	0,09 ÷ 0,16	1,33	0,88	8	60 ÷ 75	200 ÷ 220
ПС ударотривкий	1100 ÷ 1150	0,14 ÷ 1,0	1,8	0,75	6 ÷ 10	50 ÷ 70	220 ÷ 250
АБС-пластик	1050 ÷ 1100	0,16 ÷ 0,21	1,33	1,3	8	50 ÷ 80	200 ÷ 240
ПЕНТ	940 ÷ 960	0,25 ÷ 0,31	2,9	1,22	20	30 ÷ 70	240 ÷ 270
ПЕВТ	915 ÷ 935	0,3	2,5	1,38	28	30 ÷ 60	190 ÷ 220
Поліпропілен	900 ÷ 910	0,14 ÷ 0,175	1,92	0,86	16	30 ÷ 90	260 ÷ 280
Поліметилметакрилат	1180 ÷ 1200	0,187 ÷ 0,21	1,8 – 1,97	0,93	8	60 ÷ 80	200 ÷ 230
Полікапролактам	1140 ÷ 1150	0,254	2,5	0,9	10 ÷ 11	80 ÷ 90	240 ÷ 260
Поліамід 610	1100	0,268	1,97 – 2,5	1,08	11 ÷ 12	40 ÷ 60	200 ÷ 230
Полікарбонат	1200	0,198	1,25	1,32	6,75	80 ÷ 130	280 ÷ 310
Поліформальдегід	1425	0,31	1,17 – 1,46	1,5	8,1	60 ÷ 80	205 ÷ 210
Співполімери ПФ	1410	0,21	1,25	1,2	8 ÷ 10	50 ÷ 110	180 ÷ 210
ПВХ	1350	0,16	1,5	0,8	6 ÷ 7	20 ÷ 60	160 ÷ 180

ДОДАТОК 7

Умови підготовки термопластів до переробки

Позначення: $V_{\text{макс}}$ – максимальна вологість, при якій у виробках не утворюються макродефекти; $V_{\text{д}}$ – допустима вологість; $t_{\text{д}}$ – допустимий час перебування матеріалу у необігрітому бункері; h – товщина шару. Залишковий тиск $0,67 \div 1,30$ кПа.

Термопласт	$V_{\text{макс}}$, %	$V_{\text{д}}$, %		Умови попереднього сушіння або підігріву			$t_{\text{д}}$, хв.
		в бункері перероблюючого обладнання	після сушіння	T, К	t, год.	$h \cdot 10^2$, м	
ПС	0,05	$\leq 0,05$	$\leq 0,05$	3483 ± 5	$1 \div 2^*$	$1 \div 3$	Див. ^{3*}
ПК	0,02	$\leq 0,015$	$\leq 0,01$	3883 ± 5	Див. рис.7.10 ** [65]	$1 \div 2,5$	20
ПММА	–	–	–	3583 ± 5	$4 \div 5$	$1 \div 2,5$	–
ПСФ	0,02	$\leq 0,02$	$\leq 0,01$	3883 ± 5	$12 \div 20$	$1 \div 2,5$	30
ПЕ ВГ	0,04	$\leq 0,04$	$\leq 0,04$	3583 ± 5	$0,5 \div 1^*$	$1 \div 3$	Див. ^{3*}
ПЕ НГ	0,04	$\leq 0,04$	$\leq 0,04$	348 ± 5	$0,5 \div 1^*$	$1 \div 3$	Див. ^{3*}
ПП	0,04	$\leq 0,04$	$\leq 0,04$	$353 \div 373$	$0,5 \div 1^*$	$1 \div 3$	Див. ^{3*}
ПА-12	0,2	$0,08 \div 0,12$	$0,07 \div 0,11$	3583 ± 5	Див. рис. 7.11 ** [65]	$1 \div 2,5$	40
ПА-610	0,2	$0,14 \div 0,2$	$0,14 \div 0,2$	3583 ± 5	Див. рис. 7.12 ** [65]	$1 \div 2,5$	90
ПА-6	0,2	$0,15 \div 0,2$	$0,16 \div 0,2$	363 ± 5	Див. рис. 7.13 ** [65]	$1 \div 2,5$	90
ПА-66	0,2	$0,14 \div 0,2$	$0,14 \div 0,2$	–	–	–	90
СФ	$0,2^{4*}$	$\leq 0,2^{4*}$	$\leq 0,2$	348 ± 5	$3 \div 5^*$	$1 \div 3$	90
ПЕТФ	0,02	$\leq 0,015$	$\leq 0,01$	393 ± 5	$6 \div 8$	$1 \div 2,5$	20
ПБТФ	0,02	$\leq 0,015$	$\leq 0,01$	393 ± 5	Див. рис. 7.14 ** [65]	$1 \div 2,5$	20
ПАР				388 ± 5	$4 \div 6$	$1 \div 3$	–

* При атмосферному тиску.

** Тривалість сушіння залежить від початкової вологості; визначають за кривими сушіння (див. розд.7.2).

^{3*} Тривалість перебування матеріалу у необігрітому бункері не обмежується.

^{4*} Вміст води і летких речовин.

ДОДАТОК 8

Стандартні режими лиття під тиском термопластів

Матеріал	Усадка	Температура, °С		Тиск лиття, МПа
		розтопу T_p	форми T_f	
Поліетилен високого тиску	1,0 ÷ 3,5	190 ÷ 220	30 ÷ 60	40 ÷ 100
Поліетилен низького тиску	1,0 ÷ 4,0	240 ÷ 270	39 ÷ 70	50 ÷ 140
Поліпропілен	1,0 ÷ 2,5	260 ÷ 280	30 ÷ 90	80 ÷ 140
Полістирол:				
– суспензійний	0,4 ÷ 0,8	160 ÷ 220	40 ÷ 60	80 ÷ 120
– блочний	0,4 ÷ 0,8	180 ÷ 240	40 ÷ 50	80 ÷ 120
– емульсійний	0,4 ÷ 0,8	190 ÷ 230	65 ÷ 70	100 ÷ 120
– удароміцний	0,4 ÷ 1,2	180 ÷ 230	40 ÷ 70	100 ÷ 120
Співполімери стиролу:				
– САН, САМ-ЕД	0,4 ÷ 0,8	190 ÷ 230	50 ÷ 60	110 ÷ 140
– МС	0,4 ÷ 0,6	190 ÷ 220	50 ÷ 60	110 ÷ 140
– МСН	0,4 ÷ 0,6	190 ÷ 230	40 ÷ 50	110 ÷ 140
– МСН-Л	0,4 ÷ 0,6	180 ÷ 210	40 ÷ 50	100 ÷ 120
АБС-пластики:				
– 2020, 1308	0,3 ÷ 0,7	200 ÷ 240	70 ÷ 80	120 ÷ 140
– 1530	0,3 ÷ 0,7	200 ÷ 230	70 ÷ 80	100 ÷ 120
– 1106, 2802	0,3 ÷ 0,7	200 ÷ 240	70 ÷ 80	
Поліаміди:				
– 6	1,0 ÷ 2,0	240 ÷ 260	80 ÷ 90	100
– 66 /анід/	1,2	240 ÷ 270	75 ÷ 85	100 ÷ 140
– 610	0,8 ÷ 2,0	220 ÷ 260	60 ÷ 80	100 ÷ 120
Антегіт /АТМ-2/	1,1 ÷ 1,2	250 ÷ 275	60 ÷ 90	100 ÷ 110
Поліакрилати:				
– поліметилметакрилат ЛПТ	–	190 ÷ 235	–	100 ÷ 120
– поліметилметакрилат				
– суспензійний ЛСОМ	1,0	220 ± 15	60 ÷ 80	80 ÷ 100
– дакрил 2М	–	210 ÷ 220	40 ÷ 70	80 ÷ 120
Полікарбонати:				
– ПК-1	0,6 ÷ 0,8	245 ÷ 290	90 ÷ 120	100 ÷ 160
– ПК-2	0,5 ÷ 0,7	245 ÷ 290	90 ÷ 120	100 ÷ 160
– ПК-3	0,4 ÷ 0,6	245 ÷ 290	90 ÷ 120	100 ÷ 160
– ПК-5	0,5 ÷ 0,7	245 ÷ 290	90 ÷ 120	100 ÷ 160
– ПК-6	0,5 ÷ 0,7	245 ÷ 290	90 ÷ 120	100 ÷ 160
Дифлон МФ-42 (наповнений фторопластом-42 і діоксидом титану)	0,6 ÷ 1,1	245 ÷ 290	90 ÷ 120	100 ÷ 160
Співполімери формальдегіду:				
– СФД-21-1	1,9 ÷ 2,5	170 ÷ 210	60 ÷ 80	60 ÷ 150
Етроли:				
– ацетилцелюлозний	0,2 ÷ 0,9	170 ÷ 220	25 ÷ 30	80 ÷ 120
– ацетобугіратцелюлозний	–	160 ÷ 190	25 ÷ 30	80 ÷ 120
Пентапласт БГ-1	0,6	200 ÷ 230	90 ÷ 100	70 ÷ 120

ПРО АВТОРІВ

СУБЕРЛЯК Олег Володимирович – доктор хімічних наук, професор, завідувач кафедри хімічної технології переробки пластмас Національного університету “Львівська політехніка”, академік Української технологічної академії, член редколегії наукових журналів: “Український полімерний журнал”, “Вісник НУ “Львівська політехніка”, “Хімія, технологія речовин та їх застосування”.

Основні наукові інтереси пов’язані з теорією прогнозованих синтезів ко–полімерів біомедичного призначення, технологією переробки крупнотонажних полімерів та композитів на їх основі.

Автор 300 наукових праць, 36 винаходів та патентів, підручника та чотирьох навчальних посібників.

БАШТАННИК Петро Іванович – кандидат технічних наук, доцент кафедри переробки пластмас і фото-, нано- та поліграфічних матеріалів Українського державного хіміко-технологічного університету (м. Дніпропетровськ).

Галузь наукових досліджень – технологія і переробка полімерних композиційних матеріалів, що армовані вуглецевими, базальтовими і органічними волокнами.

Автор 220 наукових праць, 20 авторських свідоцтв і патентів України, двох навчальних посібників.