

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**  
до організації та проведення практичних занять  
із навчальної дисципліни

**«КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ»**

*(для студентів усіх форм навчання першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма «Електромеханіка»)*

**Харків**  
**ХНУМГ ім. О. М. Бекетова**  
**2021**

Методичні рекомендації до організації та проведення практичних занять із навчальної дисципліни «Конструкційні матеріали» (для студентів усіх форм навчання першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма «Електромеханіка») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад. : В. І. Скуріхін, Н. В. Гарбуз. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 73 с.

Укладачі: канд. техн. наук В. І. Скуріхін,  
Н. В. Гарбуз

Рецензент

**Д. Ю. Зубенко**, кандидат технічних наук, доцент Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

*Рекомендовано кафедрою електричного транспорту, протокол № 1 від 27 серпня 2020 р.*

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	4
1 ТЕРМІЧНА ОБРОБКА СТАЛЕЙ.....	5
1.1 Основні види термічної обробки сталі.....	5
1.2 Перетворення в сталі при нагріванні.....	7
1.3 Перетворення в сталі при охолодженні.....	10
1.4 Мартенситне перетворення.....	18
1.5 Перетворення в загартованій сталі при нагріві.....	22
2 ВИВЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ПОЛІМЕРНИХ ПЛАСТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	31
2.1 Полімери і полімерні матеріали .....	31
2.1.1 Загальна характеристика і класифікація.....	31
2.1.2 Пластики.....	34
2.1.3 Еластомери .....	35
2.1.4 Волокна.....	36
2.2 Переробка полімерів .....	36
2.2.1 Компаундування.....	36
2.2.2 Технологія переробки .....	38
2.2.3 Каландрування .....	38
2.2.4 Лиття.....	39
2.2.5 Пряме пресування .....	43
2.2.6 Формування .....	44
2.2.7 Екструзія.....	46
2.2.8 Спінювання.....	47
2.2.9 Армування .....	48
2.3 Пластичні маси.....	51
2.3.1 Склад пластмас.....	52
2.3.2 Основні властивості пластмас .....	52
2.3.3 Способи отримання виробів з пластмас .....	55
3 ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ. ПРОВІДНИКОВІ, НАПІВПРОВІДНИКОВІ ТА ІЗОЛЯЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ.....	58
4 МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ.....	64
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	72

## ВСТУП

Вирішення найважливіших технічних проблем, пов'язаних з економією матеріалів, зменшенням маси машин і приладів, підвищенням точності, надійності і працездатності механізмів й агрегатів багато у чому залежать від розвитку конструкційних і електротехнічних матеріалів.

Безперервний процес створення нових матеріалів для сучасної техніки збагачує науку про матеріали, яка стимулює появу нових технічних ідей.

Революційну роль зіграли напівпровідникові матеріали і рідкі кристали в електроніці, композиційні матеріали у машинобудуванні, надпровідники і аморфні сплави у електроніці тощо.

Теоретичною основою конструкційних і електротехнічних матеріалів є відповідні розділи фізики і хімії, але наука про матеріали в основному розвивається експериментальним шляхом. Тому розробка нових методів дослідження будови і фізико-механічних властивостей матеріалів сприяє подальшому розвитку матеріалознавства.

Вивчення фізичних, механічних, технологічних і експлуатаційних властивостей дозволяє визначити області раціонального використання різноманітних матеріалів з урахуванням економічних вимог.

Практикум складений відповідно до робочої програми курсу «Конструкційні матеріали» для спеціальності 141 — Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма «Електромеханіка». Метою практикуму є практичне вивчення основних властивостей матеріалів, основних технологічних процесів.

В результаті виконання практичних робіт студент здобуває знання щодо методів визначення основних властивостей матеріалів і їх обробки, прогресивних технологій, вміння і навички обробки результатів експерименту, встановлює зв'язок між теоретичними основами та їх практичним втіленням.

У кожній роботі наведені пов'язані з нею основні відомості, порядок виконання роботи, зміст звіту, контрольні питання для самоперевірки. В кінці посібника наведено рекомендований бібліографічний список.

# 1 ТЕРМІЧНА ОБРОБКА СТАЛЕЙ

**Мета роботи** — ознайомитися з методиками термічної обробки сталей.

## **Завдання:**

1. Вивчити теоретичні відомості термічної обробки сталей.
2. Визначити режим загартування зразка сталі відповідно до завдання.
3. Визначити режим низького, середнього і високого відпуску зразків сталі відповідно до завдання.
4. Вказати твердість зразків після гарту.
5. Вказати твердість зразків після відпуску.
6. Охарактеризувати структуру сталі після виконаних різних видів термічної обробки.
7. Зробити аналіз впливу термічної обробки сталі на її механічні властивості.

## **Короткі теоретичні відомості**

Властивості сплаву залежать від його структури (внутрішньої будови). Основним способом, що дозволяє змінювати структуру, а, отже, і властивості, є термічна обробка.

Основи термічної обробки були розроблені великим російським ученим Д. К. Черновим. Подальший розвиток теорія і практика термічної обробки отримала в роботах С. С. Штейнберга, А. А. Бочвара, Г. В. Курдюмова, О. П. Гуляєва, Е. Бейна, Е. Давенпорта та інших вчених.

Термічна обробка являє собою сукупність операцій нагрівання, витримки та охолодження, що проводяться в певній послідовності з метою зміни внутрішньої будови сплаву і отримання потрібних властивостей. Будь-який вид термічної обробки може бути представлений графіком в координатах температура – час (рис. 1.1, а).

### **1.1 Основні види термічної обробки сталі**

За класифікацією А. А. Бочвара розрізняють чотири основних види термічної обробки: 1) відпал I роду; 2) відпал II роду; 3) гарт; 4) відпуск.

*Відпал I роду.* Цей вид термічної обробки можливий для будь-яких металів і сплавів. Його проведення не обумовлено фазовими перетвореннями в твердому стані. Нагрівання при відпалі I роду, підвищуючи рухливість атомів, частково або повністю усуває хімічну неоднорідність, зменшує внутрішні напруження, тобто сприяє отриманню більш рівноважного стану. Основне значення при проведенні такого відпалу мають температури нагріву і час витримки при цій температурі, так як саме ці параметри визначають швидкість процесів, що усувають відхилення від рівноважного стану. Швидкість нагріву і охолодження для відпалу I роду має другорядне значення.

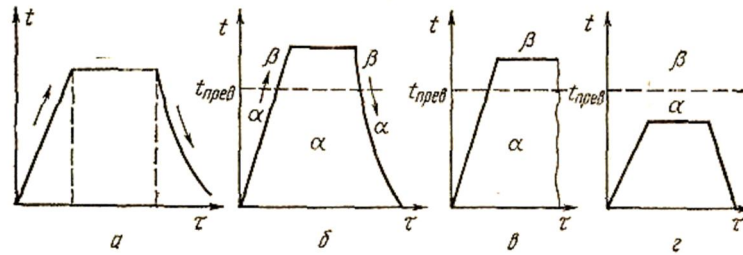


Рисунок 1.1 – Графіки різних видів термічної обробки: а – загальна схема; б – відпал II роду; в – гарт; г – відпуск

Розрізняють такі різновиди відпалу I роду:

Дифузійний відпал (гомогенізований) використовують для усунення хімічної неоднорідності, що виникає при кристалізації сплаву (дендритної ліквідації).

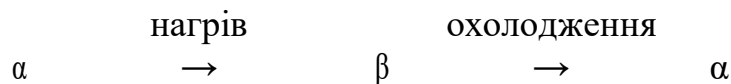
Вирівнювання хімічного складу відбувається завдяки дифузійним процесам, швидкість яких залежить від температури. Тому зазвичай температура такого відпалу становить  $(0,8 - 0,9)T_{пл}$ . Час витримки при цій температурі має забезпечити вирівнювання складу і розчинення надлишкових фаз.

Відпал рекристалізації застосовують після холодної пластичної деформації (холодної обробки тиском) для зняття наклепу і отримання рівноважного стану сплаву. В результаті рекристалізації в деформованому металі утворюються нові зерна, знімаються напруження і відновлюється пластичність металу.

Відпал для зняття напружень, що виникають при куванні, зварюванні, литті і т. п., які можуть викликати викривлення, тобто зміну форми, розмірів і навіть руйнування виробів.

*Відпал II роду.* Так називають відпал металів і сплавів, які зазнають фазові перетворення при нагріванні і охолодженні. Графічно така термічна обробка представлена на рис. 1.1, б. При нагріванні відбувається фазове перетворення  $\alpha \rightarrow \beta$ , а при охолодженні зворотнє:  $\beta \rightarrow \alpha$ .

Весь процес можна записати так:



Таку термічну обробку проводять для сплавів, в яких є поліморфні, евтектоїдні або перітектоїдні перетворення, а також може бути змінною розчинність у твердому стані. Практична доцільність фазової перекристалізації визначається тим, який вплив чинять структурні зміни на властивості сплаву.

*Загартування.* Загартування, як і відпал II роду, здійснюється тільки для металів і сплавів, що мають фазові перетворення в твердому стані. Головна відмінність цих видів термічної обробки — швидкість охолодження. Всі види відпалу проводять з повільним охолодженням, а загартування — із швидким.

Графічно гарт представлено на рис. 1.1, в. При загартуванні можливі два варіанти структурних змін: 1)  $\alpha \rightarrow \beta$ , тобто швидким охолодженням фіксується високотемпературний стан; 2)  $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha'$ , де  $\alpha'$  — метастабільна фаза, склад якої однаковий зі складом вихідної  $\beta$  фази. В цьому випадку при охолодженні відбувається бездифузійне перетворення, що має мартенситну кінетику. Для гарту основними параметрами є температура нагріву, час витримки і швидкість охолодження.

*Відпуск.* Цей вид термічної обробки можна застосовувати лише до загартованих сплавів. При цьому загартовані вироби нагрівають нижче температури фазового перетворення (рис. 1.1, з).

Основні параметри відпуску — температура нагріву і час витримки. В результаті відпуску зменшуються внутрішні напруження, сплави переходять у більш рівноважний стан. Крім цих основних видів термічної обробки, є ще два принципово різних способи обробки, що представляють поєднання термічної обробки з металургією або механічною технологією.

*Хіміко-термічна обробка (ХТО).* При цьому виді обробки обов'язково змінюється хімічний склад поверхневих шарів виробу. При ХТО оброблювані вироби нагрівають у будь-яких хімічно активних середовищах.

У результаті дифузії відбувається насичення поверхневих шарів тим або іншим елементом (зазвичай на невелику глибину). Змінюючи хімічний склад поверхневих шарів, тим самим змінюють їх властивості (твердість, зносостійкість, антикорозійні властивості і т. д.). Оскільки дифузійні процеси в твердому стані протікають повільно, ХТО зазвичай здійснюється за тривалий час. Температуру процесу вибирають конкретно для кожного виду ХТО.

*Термомеханічна обробка (ТМО).* Цей вид обробки з'явився порівняно недавно. При ТМО поєднують пластичну деформацію з термічною обробкою таким чином, щоб наклеп впливав на кінетику фазових і структурних перетворень, що відбуваються при термічній обробці.

## 1.2 Перетворення в сталі при нагріванні

В основі всіх перетворень, які відбуваються в сталі при нагріванні, лежить намагання системи до мінімуму вільної енергії (рис. 1.2). Теоретично перетворення перліту в аустеніт має відбуватися при температурі  $A_1$ , тобто при  $727\text{ }^\circ\text{C}$ . Фактично ж для цього перетворення потрібен перегрів, так як експериментально було встановлено, що навіть при звичайних швидкостях нагріву температура критичних точок  $A_1$  і  $A_3$  підвищується.

Крім того, чим вище температура, тим швидше відбувається перетворення. Перетворення перліту в аустеніт супроводжується поліморфним перетворенням  $\text{Fe}_\alpha \leftrightarrow \text{Fe}_\gamma$ , а також розчиненням цементиту  $\text{Fe}_3\text{C}$  в аустеніті.

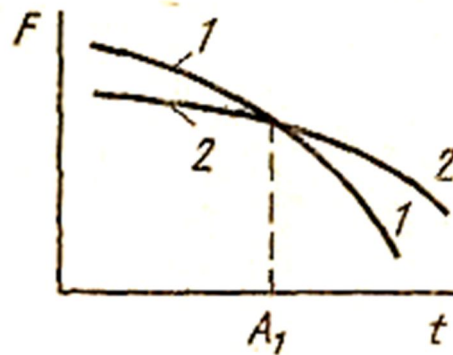


Рисунок 1.2 – Зміна вільної енергії аустеніту (1) і перліту (2) в залежності від температури

Для дослідження процесів, що відбуваються при нагріванні сталі, будують діаграми ізотермічного утворення аустеніту. Для цього зразки нагрівають до температури вище  $A_1$  і витримують при ній, фіксуючи початок і кінець перетворення. На рисунку 1.3 приведена така діаграма для сталі з 0,8 % С.

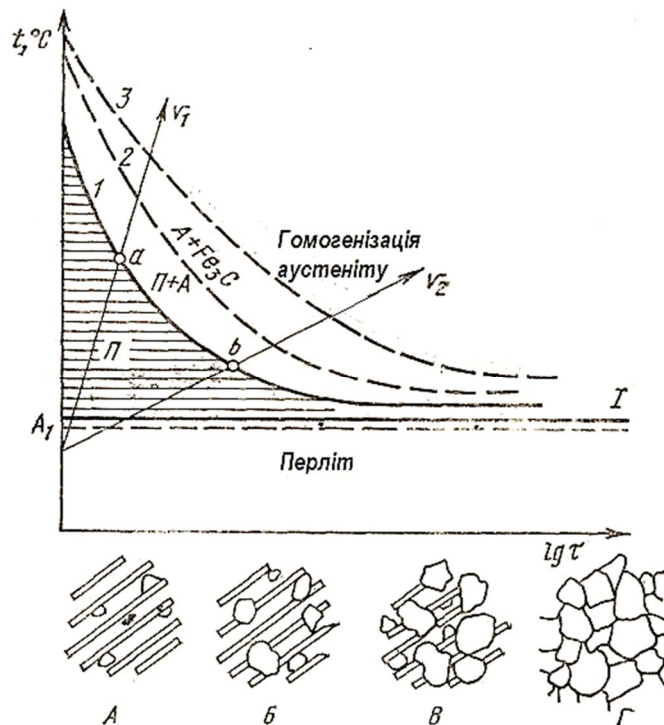


Рисунок 1.3 – Діаграма ізотермічного утворення аустеніту:

1 – початок утворення аустеніту; 2 – кінець перетворення перліту в аустеніт; 3 – повне розчинення цементиту;  $a, b$  – точки початку перетворення перліту в аустеніт при нагріванні зі швидкостями  $v_1$  і  $v_2$  ( $v_1 > v_2$ );  $A, B, B, Г$  – послідовні стадії перетворення перліту в аустеніт

Перетворення починається з зародження центрів аустенітних зерен на поверхні розділу ферит-цементит (рис. 1.3,  $A$ ). Експериментально аустеніт виявляється вже при невеликих перегрівках (вище  $727^\circ\text{C}$ ) і дуже малих витримках. За даними деяких дослідників, в процесі перетворення перліту в



аустеніт інкубаційний період відсутній, тобто перетворення починається відразу при нагріванні до температури трохи вище точки  $A_1$  (лінія  $I$  на рис. 1.3). Це пояснюється тим, що в сталі сильно розвинена поверхня розділу ферит-цементит.

Час перетворення перліту в аустеніт за ізотермічної витримки істотно залежить від температури. Це наочно показують криві початку ( $I$ ) і кінця ( $2$ ) перетворення (див. рис. 1.3). Пояснюється це тим, що зі збільшенням ступеня перегріву щодо  $A_1$  зменшується розмір критичного зародка аустеніту, збільшується швидкість виникнення зародків і лінійна швидкість їхнього зростання.

Правіше лінії  $I$  відбувається утворення зародків аустеніту на поверхні розділу фериту і цементиту в перліті (схема  $A$ ). Утворені зерна аустеніту спочатку мають таку ж концентрацію вуглецю, як і вихідна фаза — ферит, так як поліморфне перетворення протікає з більшою швидкістю, ніж дифузія вуглецю. Потім в аустеніті починає розчинятися друга фаза перліту — цементит (див. рис. 1.3, область між лініями 2 і 3, схеми  $B, B'$ ), вміст вуглецю в аустеніті збільшується. До кінця перетворення в тих місцях, де знаходилися пластини цементиту, концентрація вуглецю в аустеніті стає вищою в порівнянні з ділянками, в яких до перетворення був ферит. Тому для вирівнювання складу аустеніту потрібен якийсь час, залежний від температури — чим вище температура, при якій відбувалося перетворення  $\text{П} \rightarrow \text{А}$ , тим швидше завершиться дифузний процес перерозподілу вуглецю в аустеніт (з ростом температури нагріву зменшується стрибок концентрацій на границі аустенит-ферит — лінії  $GP$  і  $GS$  зближуються).

Вплив швидкості нагріву на тривалість перетворення характеризується променями  $v_1$  і  $v_2$ . При меншій швидкості нагріву (промінь  $v_2$ ) перетворення  $\text{П} \rightarrow \text{А}$  відбудеться при більш низьких температурах у порівнянні з більш швидким нагріванням (промінь  $v_1$ ). На швидкість перетворення перліту в аустеніт впливає також ступінь дисперсності перліту — чим дрібніше пластинки цементиту, тим швидше утворюється аустеніт, так як в цьому випадку більша міжфазна поверхня фериту з цементитом. Перліто-аустенітне перетворення супроводжується зменшенням питомого об'єму приблизно на 1 %, тому відбувається фазовий наклеп аустеніту, тобто деформація його кристалічної решітки.

Таким чином, перетворення відбувається тільки в сталі евтектоїдного складу. Доевтектоїдні сталі після нагрівання вище  $A_{C1}$  складаються з аустеніту і фериту і тільки після нагрівання вище  $A_{C3}$  (лінія  $GOS$ ) сталь набуває будови однорідного аустеніту. При нагріванні заевтектоїдних сталей вище  $A_{C1}$  спочатку перетворення протікає так само, як і в евтектоїдних сталях, тобто перліт буде перетворюватися в аустеніт. Потім у міру подальшого нагрівання в аустеніті поступово розчиняється Цц. Вище температури  $A_{cm}$  (лінія  $SE$ ) цей процес закінчується, і сталь також набуває однофазної структури аустеніту. У вуглецевих сталях утворення аустеніту і його гомогенізація протікають досить швидко — протягом декількох хвилин. У легованих сталях для цих процесів потрібно більше часу, так як

концентрація легуючих елементів у фериті і карбідах різна, і тому утворюється аустеніт неоднорідний не тільки за вуглецем, але і за концентрацією легуючих елементів, швидкість дифузії яких на кілька порядків менше швидкості дифузії вуглецю.

Початкові зерна аустеніту завжди дрібні, так як в кожній перлітній колонії одночасно зароджується кілька центрів кристалізації аустеніту (див. схему на рис. 1.3). При подальшому нагріванні зерна аустеніту ростуть, причому в різних сталях з різною швидкістю.

Сталі розрізняють по схильності до зростання зерна аустеніту при нагріванні. Якщо зерно аустеніту починає швидко рости навіть при незначному нагріванні вище  $A_1$ , то сталь вважають спадково грубозернистою; якщо зерно зростає тільки при великому перегріві, то сталь є спадково дрібнозернистою. Навіть сталі однієї марки, але різних плавок можуть сильно відрізнятися за схильністю до зростання аустенітного зерна. Це пояснюється тим, що вони містять різну кількість неметалічних включень (оксидів, нітриду, сульфідів і т. п.), які можуть ускладнювати зростання аустенітного зерна при нагріванні. Таким чином, схильність до зростання аустенітного зерна є плавковою характеристикою.

Такі елементи, як ванадій, титан, молібден, вольфрам, алюміній, зменшують схильність до зростання зерна аустеніту, а марганець і фосфор збільшують її. Заевтектійні сталі, як правило, менш схильні до зростання зерна. Умови виплавки сталі також мають велике значення, наприклад кипляча сталь зазвичай буває спадково грубозернистою.

При подальшому охолодженні зерна аустеніту не подрібнюються. Це слід враховувати при призначенні режимів термічної обробки, так як від розмірів зерна істотно залежать механічні властивості. Так наприклад, ударна в'язкість дрібнозернистої сталі може у кілька разів перевищувати ударну в'язкість крупнозернистої сталі тієї ж марки.

Розрізняють величину зерна *спадкового* і *дійсного*.

Для визначення спадкового зерна зразки нагрівають до 930 °С (проявляється схильність сталі до зростання зерна) і потім визначають розмір зерна. Від розміру зерна аустеніту залежить поведінка нагрітої сталі в різних процесах термічної обробки і пластичної деформації. Особливо чутлива до розміру зерна аустеніту ударна в'язкість.

Дійсна величина зерна — це розмір зерна при звичайних температурах, отриманого після тієї або іншої термічної обробки. Існує стандартна шкала величини зерна, згідно з якою величину зерна характеризують номером за восьмибальною системою. Величину зерна визначають під мікроскопом при збільшенні в 100 разів і порівнюють з розмірами зерна стандартної шкали. Сталі, що мають зерно до номера 4, вважають грубозернистими, а ті, що мають номер 5 – 8 — дрібнозернистими.

### 1.3 Перетворення в сталі при охолодженні

Якщо сталь охолоджувати дуже повільно, то відбуваються

перетворення, які можна встановити, користуючись діаграмою стану Fe – Fe<sub>3</sub>C. При 727 °С (*A<sub>1</sub>*) має відбуватися евтектоїдне перетворення Fe<sub>γ</sub>(C) → Fe<sub>α</sub>(C) + Fe<sub>3</sub>C.

Термодинамічною умовою цього перетворення є деяка ступінь переохолодження (охолодження нижче *A<sub>1</sub>*), коли вільна енергія перліту стає менше вільної енергії аустеніту (див. рис. 1.2).

При охолодженні сталі з більшою швидкістю кінетику і механізм перетворення аустеніту з'ясовують за допомогою постановки спеціальних експериментів. Розглянемо закономірність перетворення переохолодженого аустеніту сталі евтектоїдного складу (0,8 % C). Зразки з цієї сталі (так само, як і зразки з будь-якої іншої сталі) нагрівають до температури, при якій її структура складається з однорідного аустеніту. З діаграми Fe – Fe<sub>3</sub>C видно, що це температура близько 770 °С. Потім зразки швидко переносять в термостати із заданою температурою, меншою *A<sub>1</sub>* (інтервал між ізотермами зазвичай 25 – 50 °С), і в процесі ізотермічної витримки спостерігають за перетвореннями в аустеніті. Спостереження можна проводити, користуючись різними методами: вимірюючи твердість, електроопір, магнітні характеристики і т. п.

Перетворення аустеніту можна легко виявити за допомогою спостережень за змінами магнітних характеристик зразка, так як аустеніт парамагнітний, а механічна суміш фериту і цементиту, що утворюється, володіє феромагнітними властивостями.

У результаті отримують серію кінетичних кривих (див. рис. 1.4, *a*). По осі абсцис відкладають час, по осі ординат — відсоток перетвореного аустеніту. Спочатку спостерігається інкубаційний або підготовчий період — час, протягом якого зберігається переохолоджений аустеніт (*Oa<sub>1</sub>*, *Oa<sub>2</sub>* і т. д.). Точки *a* — це початок перетворення, вони відповідають перетворенню 0,5 – 1 % аустеніту. Характер кривої показує, що перетворення протікає з різною швидкістю і досягає максимуму при утворенні приблизно 50 % продуктів перетворення. Після отримання близько 70 % продуктів швидкість перетворення починає зменшуватися і поступово згасає в міру наближення до 0 % кількості аустеніту, що залишився, (*b<sub>1</sub>*, *b<sub>2</sub>*, *b<sub>3</sub>* і т. д.).

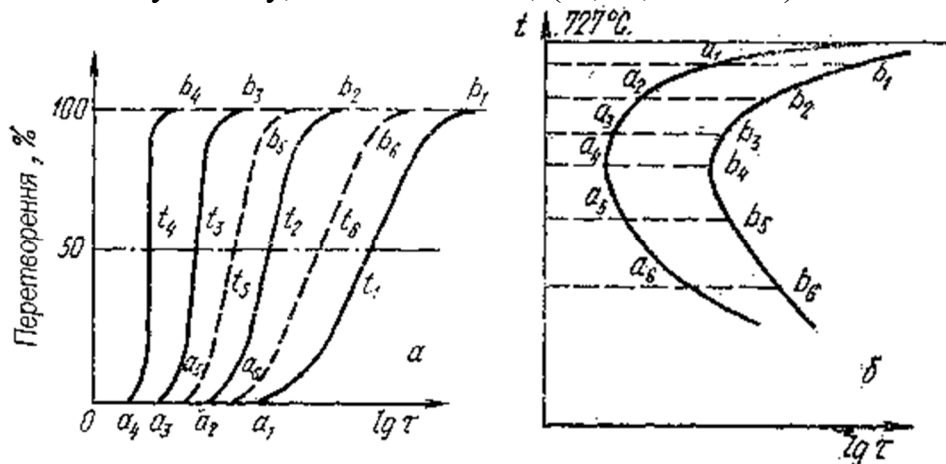


Рисунок 1.4 – Кінетичні криві ізотермічного перетворення аустеніту (*a*) і побудована за ним діаграма (*b*)

Зі збільшенням ступеня переохолодження стійкість переохолодженого аустеніту зменшується ( $Oa_1 > Oa_2 > Oa_3$ ), але досягнувши мінімуму при переохолодженні нижче  $A_1$  на 150 – 200 °С, знову збільшується ( $Oa_4 < Oa_5 < Oa_6$ ).

За отриманими експериментальними точками будують діаграму ізотермічного перетворення переохолодженого аустеніту в координатах  $t - \lg t$  (див. рис. 1.4, б). На цій діаграмі ліва крива ( $a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6$ ) є границею початку перетворення переохолодженого аустеніту, вона показує залежність величини інкубаційного періоду від ступеня переохолодження. Права крива ( $b_1 b_2 b_3 b_4 b_5 b_6$ ) показує кінець перетворення аустеніту, тобто залежність часу, необхідного для повного перетворення аустеніту, від ступеня переохолодження.

Такі діаграми зазвичай називають *діаграмами ізотермічного перетворення аустеніту*, а також S-подібними діаграмами за схожість кривих початку і кінця перетворення аустеніту з буквою S (у перекладі з англ. TTT – діаграми: time – temperature – transformation (час – температура – перетворення)), що правильно відображає їх сутність. Вперше діаграма ізотермічного розпаду аустеніту в сталі була побудована в 1930 р. Бейном і Давенпортом.

На рисунку 1.5 приведена діаграма ізотермічного перетворення аустеніту для евтектоїдної сталі (0,8 % С).

Перлітне перетворення відбувається у верхній частині діаграми (вище 500 °С). Сутність перетворення полягає в тому, що в результаті перетворення аустеніту утворюється механічна суміш двох фаз — фериту і цементиту, склад яких відрізняється від складу вихідного аустеніту. Вихідний аустеніт містить 0,8 % С, а утворені фази — ферит ~ 0,02 % С, цементит 6,67 % С.

Отже, це перетворення є дифузійним. У той же час, як було показано, час стійкості аустеніту і швидкість його перетворення залежать від різниці вільних енергій  $\Delta F = F_A - f_n$ , тобто від ступеня переохолодження.

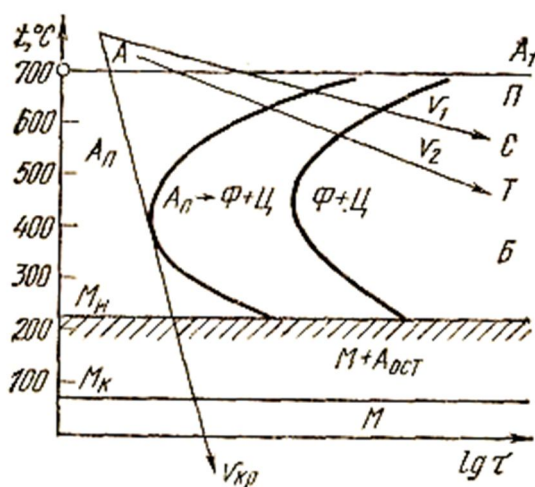


Рисунок 1.5 – Діаграма ізотермічного перетворення аустеніту для евтектоїдної сталі (0,8 % С):  $A$  – стійкий аустеніт;  $A_n$  – переохолоджений нижче  $A_1$  аустеніт;  $\Phi$  – ферит;  $\text{Ц}$  – цементит

Швидкість дифузії  $D$  і різниця вільних енергій  $\Delta F$  залежать від ступеня переохолодження протилежно: швидкість дифузії експоненційно зменшується у міру зниження температури перетворення, а різниця вільних енергій збільшується (рис. 1.6).

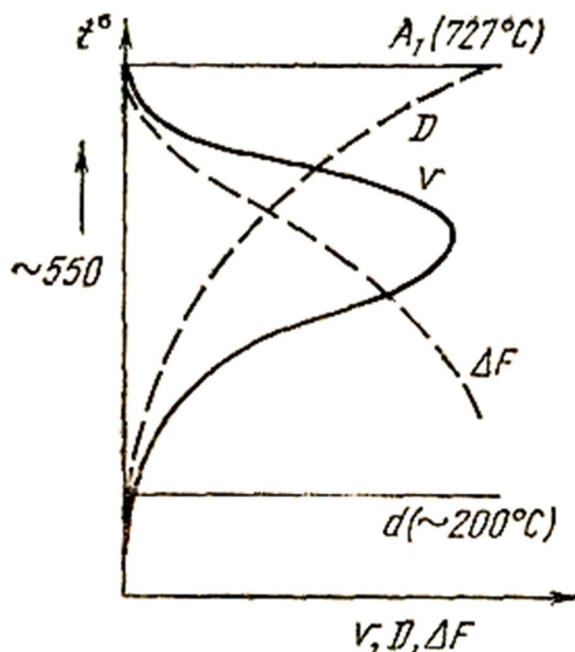


Рисунок 1.6 – Швидкість розпаду аустеніту  $v$  в залежності від ступеня переохолодження:  $D$  – швидкість дифузії;  $\Delta F$  – різниця вільних енергій

Максимальна швидкість перетворення відповідає переохолодженню нижче  $A_1$  на  $(150 - 200)^\circ\text{C}$ , тобто відповідає мінімальній стійкості аустеніту. При подальшому зниженні температури значно зменшується швидкість дифузії, завдяки чому збільшується стійкість аустеніту. Криві початку і кінця перетворення зсуваються вправо (див. рис. 1.4, б, 1.5).

*Механізм перлітного перетворення.* При утворенні з аустеніту перліту ведучою фазою є цементит (в зерні аустеніту завжди є флуктуаційні збагачення вуглецем, особливо поблизу границь зерна).

Зародження цементитних зародків полегшено на границі аустенітних зерен, так як тут менша робота утворення критичного зародка. Новоутворена пластинка цементиту росте, подовжується і тим самим збіднює сусідні ділянки аустеніту вуглецем. Тому поряд з пластинкою цементиту — уздовж неї — утворюється пластинка фериту. Таке кооперативне зростання двофазної колонії в результаті дифузійного перерозподілу компонентів — найбільш характерна особливість перлітного перетворення. Перліт займає обсяг більше, ніж аустеніт, тому в міру зростання перлітної колонії в аустеніті виникають напруження. Це викликає утворення пластинок перліту вже з іншою орієнтацією (рис. 1.7, 1.8).

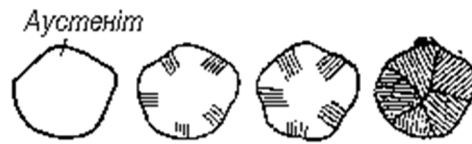


Рисунок 1.7 - Схема утворення перліту



Рисунок 1.8 – Мікроструктури, що характеризують процес утворення перліту з аустеніту при 705 °С (Бейн), X 500. Час перетворення, с: а – 400; б – 1 150; в – 1 320; г – 1 450; д – 4 000

Оскільки зі збільшенням ступеня переохолодження зростає число зародків нових зерен, кількість ферито-цементитних пластинок збільшується, а їх розміри і відстані між ними сильно скорочуються. Дисперсність утворених фаз збільшується також і внаслідок зменшення швидкості дифузії з переохолодженням.

*Перліт (П), сорбіт (С), троостит (Т)* являють собою механічну суміш фериту і цементиту. Ці структури розрізняються лише ступенем дисперсності карбідної складової, тобто міжпластинковою відстанню, (середня сумарна товщина сусідніх пластинок фериту і цементиту), яка є найважливішою структурною характеристикою, що визначає механічні властивості сталі (рис. 1.9, а – е).

Різкого розмежування між П, С, Т не існує: у міру зниження температури поступово відбувається перехід від однієї структури до іншої. Твердість ферито-цементитної суміші прямо пропорційна площі поверхні розділу між феритом і цементитом.



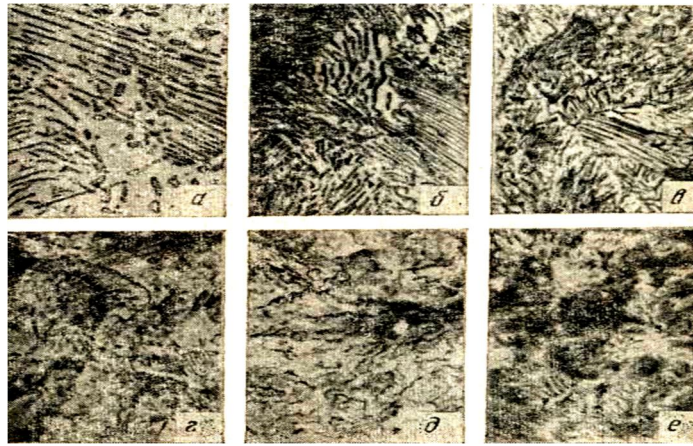


Рисунок 1.9 – Структура евтектоїдної сталі в залежності від температури розпаду аустеніту, X100: *a – в* – перліт; *г* – сорбіт; *д – е* – троостит

Тому зі збільшенням ступеня дисперсності фаз збільшується їх твердість (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Твердість фаз

$t_{\text{перетв}}, ^\circ\text{C}$	$\tau_{\text{перетв}}, ^\circ\text{C}$	Структура	$d$ , мкм	Твердість, НВ
700	600	П. п.	1,0 — 0,77	200
675	30	Т.п.	~ 0,5	250
650 — 600	10	С	0,4 — 0,25	300
600 — 550	5	Т	~ 0,1	400

Примітка. П.п. – пластинчастий перліт; Т.п. – тонкопластинчастий перліт; С – сорбіт; Т – троостит (0,8 % С)

#### *Бейнітне перетворення*

Вище 500 °С швидкість дифузії достатня для того, щоб утворений ферит містив рівноважну кількість вуглецю. Якщо збільшити ступінь переохолодження, то нижче вигину S-подібної кривої утворюється голчата структура, що називається голчастим трооститом або бейнітом (рис. 1.10).

Бейнітне перетворення називають також проміжним перетворенням, оскільки воно відбувається при температурах між перлітним — дифузійним перетворенням і мартенситним — бездифузійним (нижче лінії  $M_n$  на діаграмі рис. 1.5).

Головна відмінність бейніта від перлітових структур — вміст вуглецю у фериті. При високих температурах вуглець встигає виділятися з розчину і ферит містить близько 0,01 – 0,02 % С. При низьких температурах (приблизно (500 – 250) °С) швидкості дифузії малі, вуглець не встигає повністю виділитися з розчину, тому ферит містить ~ 0,1 % С (400 °С) і навіть ~ 0,2 % С (300 °С).

Поблизу границі з областю перлітного перетворення утворюється «верхній» або перистий бейніт («верхній» перистий троостит). Він

складається з не завжди паралельних один одному коротких пластинок цементиту і фериту, що чергуються. При температурах порядку 300 °С утворюється «нижній» або голчастий бейніт («нижній» голчастий троостит), який нагадує за своєю будовою мартенсит.

При великих збільшеннях (електронний мікроскоп) можна побачити, що голки складаються з найдрібніших пластинок цементиту і фериту. Розмір частинок близько (0,09 – 0,08) мкм. Частинки цементиту орієнтовані уздовж октаедричних площин вихідного аустеніту. Твердість бейніта близько *HB500*.

На рисунку 1.10 показаний процес перетворення переохолодженого аустеніту в бейніт.

Властивості бейніта «верхнього» і «нижнього» істотно різняться. У першому випадку спостерігається погане поєднання механічних властивостей — недостатня міцність при низьких значеннях  $\sigma$  і  $\alpha_n$ . Нижній бейніт, що утворюється при температурах  $M_n + (50 - 110 \text{ } ^\circ\text{C})$ , має високу міцність при хорошому поєднанні з пластичністю і в'язкістю.

Для різних марок сталей S-подібні діаграми відрізняються розташуванням ліній, тобто таку діаграму будують для кожної марки сталі.

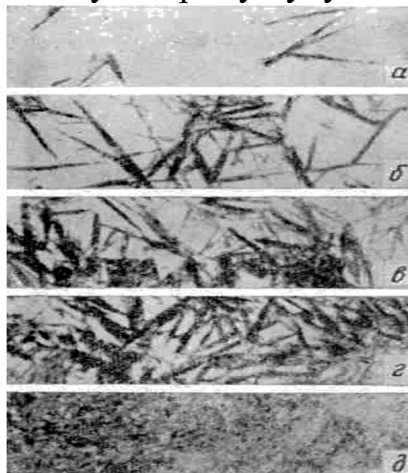


Рисунок 1.10 – Мікроструктури, що характеризують процес розпаду аустеніту при температурах, що лежать нижче вигину S-подібної кривої.

Температура перетворення 260 °С (Бейн), X500. Час перетворення, с:  
*a* – 400; *б* – 500; *в* – 850; *г* – 900; *д* – 2500

Легуючі елементи, що не утворюють карбідів, збільшують стійкість переохолодженого аустеніту: на діаграмі ізотермічного перетворення таких сталей лінії початку і кінця перетворення зсуваються вправо (рис. 1.11, *a*) у порівнянні з вуглецевими сталями (при однаковому вмісті вуглецю).

По різному впливають легуючі елементи і на температуру початку мартенситного перетворення. Як правило, вони знижують температуру  $M_n$  (за винятком кобальту і алюмінію, рис. 1.12).



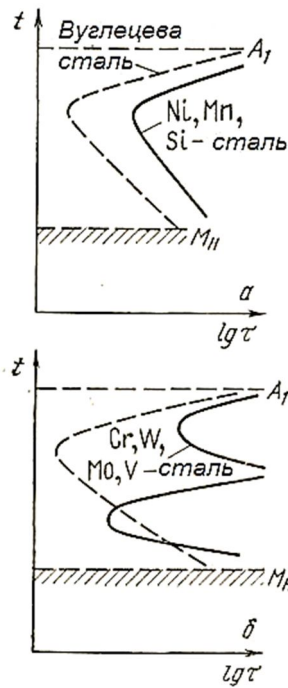


Рисунок 1.11 – Діаграми ізотермічного перетворення аустеніту вуглецевих і легуваних сталей: *а* – легуючі елементи не утворюють карбідів; *б* – легуючі елементи утворюють карбіди

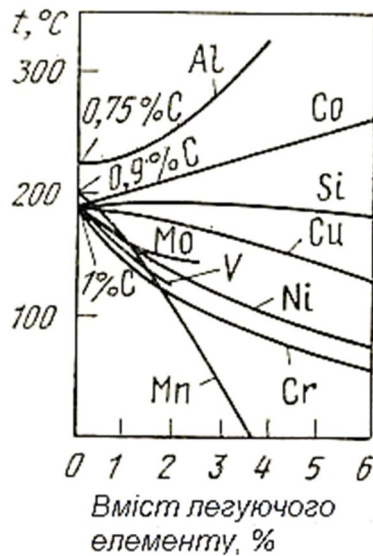


Рисунок 1.12 – Залежність температури початку мартенситного перетворення від вмісту легуючих елементів

Карбідотворні елементи чинять більш складний вплив на ізотермічне перетворення аустеніту. У цьому випадку можливі дві області мінімальної стійкості аустеніту, сповільнюється утворення перлітних структур і прискорюється бейнітне перетворення (рис. 1.11, б).

Крім наведених на рисунку 1.12 принципово різних діаграм, при введенні легуючих елементів в сталь можливі і інші, більш складні діаграми.

Діаграми ізотермічного перетворення аустеніту, побудовані в координатах час – температура, мають велике практичне значення при

призначенні режимів термічної обробки на практиці. Хоча діаграми побудовані в результаті вивчення ізотермічного перетворення, з їх допомогою можна аналізувати процеси фазових перетворень, що протікають при безперервному охолодженні. На рисунку 1.5 на діаграму ізотермічного перетворення аустеніту нанесені криві охолодження, які відповідають різним режимам. Так наприклад, для отримання структури сорбіту слід проводити охолодження зі швидкістю  $v_1$ , а для отримання троостита —  $v_2$ . Збільшуючи швидкість охолодження, можна отримати в деталі структуру мартенситу.

#### 1.4 Мартенситне перетворення

При великих ступенях переохолодження, наприклад при  $230\text{ }^\circ\text{C}$  для евтектоїдної сталі, аустеніт знаходиться в нестійкому стані. При цих температурах алотропічне перетворення  $\text{Fe}_\gamma \rightarrow \text{Fe}_\alpha$  відбувається в умовах, коли швидкість дифузії вуглецю дуже мала (див. рис. 1.6). При бездифузійному перетворенні  $\text{Fe}_\gamma(\text{C}) - \text{Fe}_\alpha(\text{C})$  весь вуглець, розчинений у решітці аустеніту, залишається в решітці фериту. Так як максимальна розчинність вуглецю в  $\alpha$ -залізі не перевищує  $0,02\%$ , а в початковій фазі — аустеніті — може міститися до  $2,14\%$  С, то утворюється пересичений твердий розчин, званий мартенситом.

*Мартенсит* — це пересичений твердий розчин впровадження вуглецю в  $\text{Fe}_\alpha$ . Атоми вуглецю знаходяться в міжвузлях: або в центрі основ тетрадрів, або посередині їх довгих ребер (рис. 1.13). При утворенні мартенситу решітка  $\text{Fe}_\alpha$  сильно спотворюється, перетворюючись з кубічної в тетрагональну ( $c/a > 1$ ) решітку.

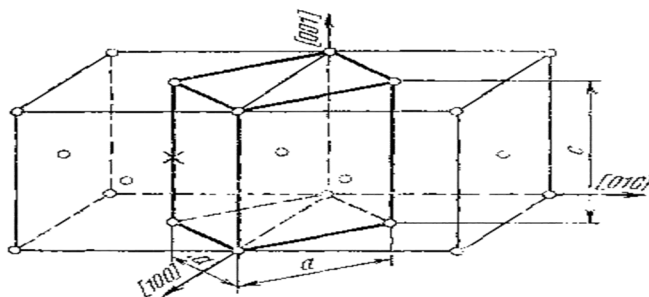


Рисунок 1.13 – Схема перебудови решітки аустеніту в решітку мартенситу (X – атом вуглецю)

Зі збільшенням вмісту вуглецю ступінь тетрагональності решітки мартенситу збільшується (рис. 1.14):  $c/a = 1 + 0,046p$ , де  $p$  — вміст вуглецю, % (по масі).

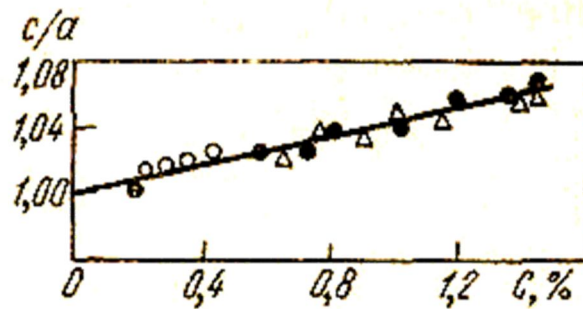


Рисунок 1.14 – Зміна ступеня тетрагональності мартенситу від вмісту вуглецю (за даними різних авторів)

Найменша швидкість охолодження, необхідна для утворення структури мартенситу, називається *критичною швидкістю гарту*  $v_{кр}$  (див. рис. 1.5).

Механізм мартенситного перетворення має ряд особливостей, що відрізняють його від дифузійних перетворень.

Великий внесок у дослідження цього перетворення внесли радянські вчені С. С. Штейнберг, Г. В. Курдюмов, В. Д. Садовський, О. П. Гуляєв.

Як було зазначено раніше, *перша основна особливість мартенситного перетворення* — його бездифузійний характер (під бездифузійним перетворенням слід розуміти не відсутність будь-яких переміщень атомів, а відсутність дифузійного переміщення атомів вуглецю).

Г. В. Курдюмов вказував: «Мартенситне перетворення полягає в закономірній перебудові решітки, при якій атоми не обмінюються місцями, а лише зміщуються один щодо одного на відстані, що не перевищують міжатомні». Атоми переміщуються в певних напрямках однаково і взаємопов'язано, тобто відбувається *кооперативне одночасне переміщення атомів*, розташованих в одній або декількох суміжних кристалографічних площинах.

Необхідна для цього процесу енергія виходить за рахунок різниці вільних енергій аустеніту і мартенситу.

Об'єм утвореного мартенситу більше об'єму вихідного аустеніту, тому в процесі росту нової фази зростає величина пружної енергії до тих пір, поки не буде перевершена границя пружності в перехідній зоні. Після цього в ній відбудеться пластична деформація (зрушення), порушиться спряженість кристалів, припиниться зростання кристала мартенситу (в цих умовах неможливе кооперативне спрямоване зміщення атомів). Кристалічна решітка утвореного мартенситу закономірно орієнтована по відношенню до решітки аустеніту. У процесі росту мартенситного кристала на кордоні між ним і аустенітом є безперервний перехід від решітки аустеніту до ґрат мартенситу, тобто є когерентність (пружний зв'язок) двох решіток (рис. 1.15). При когерентному зростанні нової фази атоми переміщуються тільки на невеликі близькі відстані. Це означає, що сусіди будь-якого атома в початковій фазі залишаються сусідами цього ж атома в новій фазі. Поверхнева енергія при такому зростанні дуже мала.

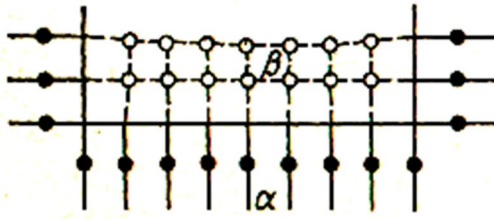


Рисунок 1.15 – Схема утворення когерентної межі між кристалами фаз  $\alpha$  і  $\beta$

У результаті — низьке значення енергії активації, а лінійна швидкість росту нової фази повинна бути дуже великою. Це підтверджується експериментально. Енергія активації такого процесу становить 1000 кал/г атом, а швидкість росту кристала мартенситу приблизно 1000 м/с. Він утворюється практично миттєво (за  $10^{-7}$  с).

Отже, друга особливість мартенситного перетворення – орієнтованість кристалів мартенситу. Орієнтований зсув атомів при мартенситних перетвореннях призводить навіть до утворення на полірованій поверхні рельєфу. Як показано експериментально О. П. Гуляєвим, кристали мартенситу мають форму пластин. У площині шліфа видно зазвичай їх перерізи, тому мартенситна структура під мікроскопом виглядає як голчаста (рис. 1.16).

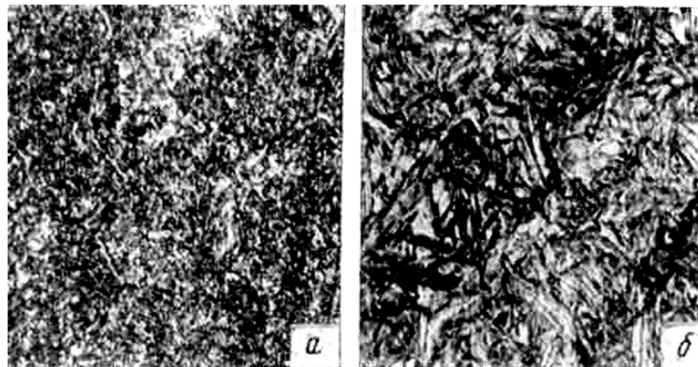


Рисунок 1.16 – Структура дрібноголчастого (а) і великоголчастого (б) мартенситу сталі У10. X500

Утворюючись миттєво (зі швидкістю вибуху), пластини мартенситу ростуть або до межі зерна аустеніту, або до дефекту.

Утворені такі мартенситні пластини розташовані до перших під кутами  $60^\circ$  або  $120^\circ$  і розміри їх обмежені ділянками між першими пластинами (у цьому закономірному орієнтуванні проявляється принцип структурної відповідності між утвореним мартенситом і вихідною фазою — аустенітом). Чим більше вихідне зерно аустеніту, тим більші і пластинки мартенситу, тобто він буде грубоголчастим (рис. 1.16, б).

Третя особливість мартенситного перетворення — воно відбувається тільки при безперервному охолодженні, тобто в інтервалі температур, починаючись і закінчуючись для кожної сталі при певній температурі незалежно від швидкості охолодження. Температуру початку мартенситного

перетворення називають мартенситною точкою і позначають  $M_n$ , а температуру закінчення позначають  $M_k$  (див. рис. 1.5).

Положення точок  $M_n$  і  $M_k$  залежить від вмісту вуглецю в сталі (рис. 1.17) і присутності легуючих елементів і не залежить від швидкості охолодження. Тому на S-подібній діаграмі  $M_n$  і  $M_k$  — горизонтальні лінії.

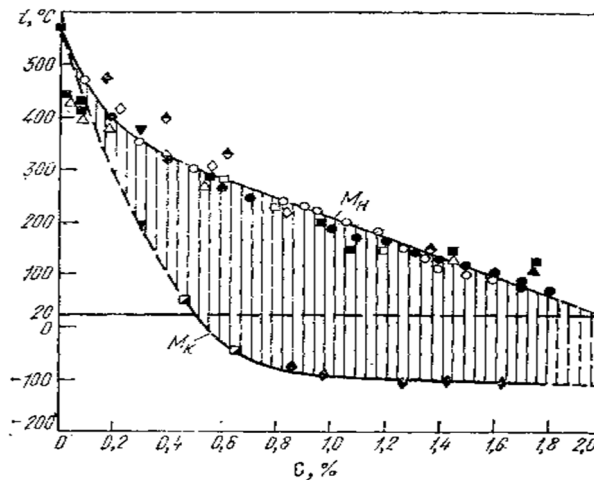


Рисунок 1.17 – Залежність температури початку ( $M_n$ ) і кінця ( $M_k$ ) мартенситного перетворення від вмісту вуглецю в сталі за даними різних авторів

Якщо ізотермічну витримку проводити в інтервалі  $M_n - M_k$ , то, незважаючи на наявну іноді навіть велику кількість аустеніту, мартенситне перетворення припиняється. Причина такого явища поки ще остаточно не з'ясована, але практично воно має велике значення: якщо для будь-якої сталі  $M_k$  знаходиться в області негативних температур (наприклад, для сталі, що містить більше 0,6 % C), то при кімнатній температурі в структурі поряд з мартенситом буде зберігатися якась кількість аустеніту. Такий аустеніт називають залишковим  $A_{ост}$ . (невелика кількість залишкового аустеніту є в сталях і після охолодження нижче  $M_k$ ).

Властивості мартенситу обумовлені особливостями його утворення. Мартенсит характеризується дуже високою твердістю ( $HRC55 - 65$ ) і крихкістю. Така висока твердість пояснюється, по-перше, тим, що при утворенні пересиченого вуглецем твердого розчину кристалічна решітка  $Fe_\alpha$  сильно спотворюється, в ній створюються великі внутрішні напруження. По-друге, внаслідок збільшення об'єму при перетворенні аустеніту в мартенсит виникає фазовий наклеп, що сприяє подрібненню блокової структури і зростанню внутрішніх напружень. У сталях і сплавах на основі заліза спостерігають два морфологічних типу мартенситу — пластинчастий і рейковий.

*Пластинчастий мартенсит*, який також називають голчастим, низькотемпературним або двійникованим, утворюється в високовуглецевих сталях і сплавах заліза з великим вмістом нікелю. Кристали пластинчастого мартенситу мають форму тонких лінзоподібних пластин, які в розрізі на

шліфі виглядають голками. Така форма мартенситу відповідає мінімуму енергії пружних спотворень під час його утворення в аустенитній матриці і аналогічна формі механічних двійників.

*Рейковий мартенсит*, званий також масивним, високотемпературним, недвійникованим, утворюється в загартованих маловуглецевих і середньовуглецевих сталях, а також в більшості конструкційних легованих сталях. Кристали цього мартенситу мають форму тонких рейок, витягнутих в одному напрямку (звідси назва цієї форми мартенситу). Рейки паралельні і утворюють щільний пакет, всередині якого вони розділені мало- або висококутовими межами.

Величезна швидкість утворення пластин мартенситу пояснюється когерентністю і пружним сполученням двох решіток — утвореного мартенситу і вихідної фази, аустеніту. Відбувається «ковзний» рух, обумовлений бездифузійним, кооперативним рухом атомів на відстані, менші міжатомних. Так само характерною рисою кінетики мартенситного перетворення є його автокаталітичність, що нагадує ланцюгові реакції. На швидкість росту кристалів мартенситу дуже впливає щільність дислокацій і механізм їх руху — ковзання разом з границею або переповзання. Підвищена щільність дефектів (дислокацій, двійникових прошарків) чинить додатковий вплив і на фазовий наклеп, що спостерігається при перетворенні аустеніту в мартенсит (об'єм мартенситу більше об'єму аустеніту). Крім того, підвищена щільність дислокацій, особливо їх поява на границі фаз, може привести навіть до часткового порушення когерентності.

Мартенситне перетворення відбувається не тільки у сталей, воно виявлено у багатьох металів і сплавів, що зазнають алотропічні або поліморфні перетворення при швидкому значному переохолодженні високотемпературних модифікацій. Особливістю мартенситного перетворення в сталях є його незворотність. Перетворення аустеніту в мартенсит — бездифузійний процес. Перетворення мартенситу в аустеніт при нагріванні відбувається дифузійно.

### **1.5 Перетворення в загартованій сталі при нагріві**

Мартенсит загартування — нерівноважна (метастабільна) структура, що зберігається зважаючи на малу рухливість атомів при низьких температурах. При загартуванні у виробках завжди виникають великі внутрішні напруження в результаті об'ємних змін. Для отримання більш рівноважного стану після гарту вироби піддають відпуску, нагріваючи до температур нижче  $A_{C1}$ . Вивчаючи процеси, що відбуваються в загартованій сталі при нагріванні, найбільш часто користуються приладом — дилатометром. У прилад поміщають два однакових за розмірами зразка з однієї і тієї ж сталі. Один із зразків знаходиться в відпаленому, інший - в загартованому станах. При нагріванні до температур нижче  $A_{C1}$  у відпаленому зразку ніяких перетворень не відбувається, його розміри змінюються лише за рахунок теплового розширення, а в загартованому зразку відбуваються і структурні

перетворення, що супроводжуються змінами об'єму. Прилад диференційний, він показує тільки ті зміни розмірів, які відбуваються в загартованому зразку при нагріванні за рахунок структурних перетворень. В результаті виходить крива, подібна до наведеної на рисунку 1.18.

Розрізняють чотири основних перетворення, що відбуваються при нагріванні загартованої сталі. В результаті зміни складу сталі і часу витримки при відпуску відбувається зміщення температурних інтервалів цих перетворень, однак сутність процесів залишається незмінною.

Перше перетворення відбувається при температурі до 200 °С. При низьких температурах — до 100 °С — швидкість дифузії дуже мала. Так, при 0° С час, протягом якого половина обсягу мартенситу братиме участь в початковій стадії розпаду, це сотні років. При 20 °С на цей же процес буде потрібно близько шести років, а при 100 °С всього лише 50 хв. Тому до 80 °С за час експерименту практично ніяких змін в загартованому зразку не спостерігається. В інтервалі температур від 80 до 150 – 200 °С відбувається так званий «двофазний» або «гетерогенний» розпад мартенситу.

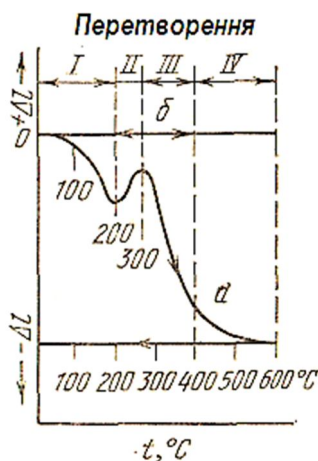


Рисунок 1.18 – Дилатометрична крива відпуску загартованої (а) і відпаленої (б) вуглецевої сталі (1,2% С)

При цих температурах в окремих ділянках вихідного мартенситу виділяються найтонші пластини карбиду. Товщина таких пластинок складає кілька атомних шарів, довжина — кілька сотень ангстрем. Решітка утвореного карбиду когерентна решітці мартенситу, тобто на їх границі є загальний шар атомів. Склад утворених пластинок карбиду остаточно не встановлено. Відомо, що він метастабільний, має гексагональну решітку. Його позначають як  $\epsilon$ -карбід або карбід  $Fe_xC$ .

У безпосередній близькості від утворених пластинок карбиду твердий розчин збіднюється вуглецем, зменшується тетрагональність мартенситу. Але при цих температурах зважаючи на малу швидкість дифузії концентрація не встигає вирівнюватися, тому в одному зерні можуть співіснувати два твердих розчини з однаковим типом решітки, але з різною концентрацією вуглецю. Тому такий розпад мартенситу і називається «двофазним».

Кристали утворених карбідів при цих температурах не ростуть. Процес



розвивається за рахунок виділення нових частинок карбїду в тих ділянках мартенситу, які мають вихїдну концентрацію вуглецю.

В результатї першого перетворення при вїдпуску виходить так званий вїдпущений або кубїчний мартенсит.

*Вїдпущений мартенсит* — це гетерогенна сумїш пересиченого вуглецем  $\alpha$ -розчину неоднорїдної концентрації (вїд вихїдної до небагато бїльшою, нїж у феритї) і невїдокремлених частинок карбїду. Зї зменшенням тетрагональностї мартенситу зменшується об'єм всього зразка (див. рис. 1.18).

*Друге перетворення* вїдбувається в їнтервалї температур 200 – 300 °С. У цьому їнтервалї залишковий аустенїт перетворюється в вїдпущений мартенсит. Таке перетворення можливе внаслїдок того, що зї зменшенням тетрагональностї мартенситу зменшуються стискаючі напруження, які дїють на залишковий аустенїт.

Перетворення аустенїту супроводжується деяким збїльшенням об'єму. Одночасно вїдбувається зменшення тетрагональностї мартенситу і при температурах бїльшче до 300 °С починаються вїдокремлення і зростання частинок карбїду. Внутрїшнї напруження зменшуються.

*Третє перетворення* вїдбувається в їнтервалї 300 – 400 °С. Швидкїсть дифузїї при цих температурах помїтно збїльшується, весь надлишковий вуглець поступово вїдїляється з решїтки  $Fe_\alpha$ , карбїднї частинки повнїстю вїдокремлюються, набувають будови  $Fe_3C$  і починають рости. Утворена високодисперсна сумїш фериту і цементиту називається *трооститом вїдпуску*.

*Четверте перетворення* — при нагрїваннї вище 400 °С. При цїй температурї вїдбуваються поступове зростання частинок карбїду і їх коагуляція. При 550 – 600 °С розмїр частинок дорївнює 0,1 – 0,2 мкм. Така структура називається *сорбїтом вїдпуску*.

На вїдмїну вїд сорбїту, отриманого при охолодженнї аустенїту, цементит в сорбїтї вїдпуску має округлу форму. При нагрїваннї загартованої сталї до 650 – 700 °С отримують перлїт вїдпуску або глобулярний перлїт з розмїром частинок 0,3 – 0,4 мкм.

Мала дифузїйна рухливїсть атомів легуючих елементів чинить їстотний вплив на процеси, що протїкають в загартованих сталях при вїдпуску (тїльки нїкель і марганець не роблять помїтного впливу на цї процеси). На першу стадїю розпаду мартенситу (до 150 °С), коли вїдбувається «двофазний» розпад, вплив легуючих елементів незначний. Карбїд залїза, що вїдїляється, має таку ж концентрацію легуючих елементів, як і вихїдний мартенсит, і також їснує когерентний зв'язок.

При подальшому нагрїваннї процес протїкає повїльнїше, нїж в вуглецевих сталях, тому легованї сталї зберїгають структуру вїдпущеного мартенситу до бїльш високих температур (їнодї до 400 – 500 °С).

Легування має суттєвий вплив на друге перетворення залишкового аустенїту в вїдпущений мартенсит. Температура цього перетворення пїдвищується. Так як в легованих сталях, як правило, зберїгається значна



кількість залишкового аустеніту, то перетворення останнього в відпущений мартенсит сприяє збереженню твердості до більш високих температур.

Третє і четверте перетворення в легованих сталях також відбуваються при більш високих температурах. Тому після однакових по температурі нагрівів загартованих сталей леговані сталі мають більш високу твердість і міцність.

Карбідна фаза при відпуску зазнає специфічних перетворень. З підвищенням температури збільшується рухливість атомів легуючих елементів, завдяки чому стає можливим їх перерозподіл між цементитом і феритом. Концентрація легуючих елементів у цементиті збільшується і при певних значеннях решітка цементиту перебудовується в решітку того спеціального карбиду, який може знаходитися в даній сталі у рівновазі з феритом (при збереженні легованого мартенситу до високих температур можливе виділення спеціального карбиду і безпосередньо з мартенситу). Утворені дисперсні карбіди можуть значно збільшувати твердість.

Таким чином, вище були розглянуті чотири основних перетворення в сталі, що протікають при нагріванні і охолодженні:  $\text{П} \rightarrow \text{А}$ ,  $\text{А} \rightarrow \text{П}$ ,  $\text{А} \rightarrow \text{М}$  і  $\text{М} \rightarrow \text{П}$ . В основі всіх перетворень лежить намагання системи до мінімуму вільної енергії. На рисунку 1.19 приведена схема зміни вільної енергії основних структур зі зміною температури. З цієї схеми видно, що перетворення  $\text{М} \rightarrow \text{А}$  і  $\text{П} \rightarrow \text{М}$  неможливі.

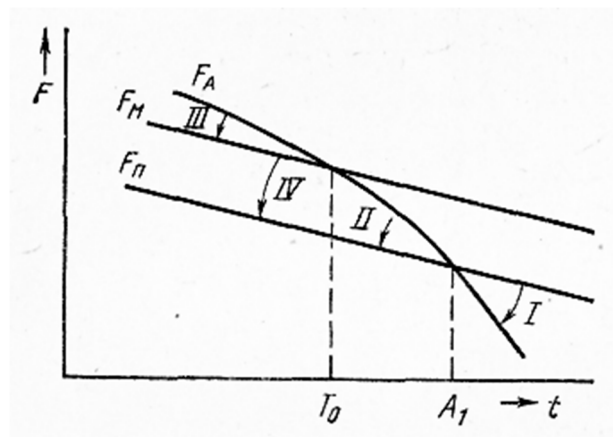


Рисунок 1.19 – Зміна вільної енергії аустеніту (F<sub>A</sub>), мартенситу (F<sub>M</sub>) і перліту (F<sub>P</sub>) зі зміною температури; T<sub>0</sub> – температура метастабільної рівноваги А – М

### ***Практика гарту і відпуску сталі***

Загартування вуглецевих сплавів проводиться з метою підвищення їх механічних властивостей: твердості, межі міцності, пружності і зносостійкості.

Процес загартування складається з наступних етапів:

- а) нагрівання виробу до температури гарту;
- б) витримки виробу протягом певного часу при заданій температурі;
- в) охолодження виробу з потрібною швидкістю.

Температура нагріву під загартування повинна забезпечити в сталі аустенітну структуру. На рисунку 1.20 показаний інтервал температур для гартування сталей в залежності від вмісту вуглецю. Якщо доєвтектоїдну сталь нагрівати до аустеніто-феритної структури, то гарт буде неповним, а твердість сталі — невисока (в структурі буде ферит). Заєвтектоїдні сталі рекомендується нагрівати до аустеніто-цементитної структури, тобто проводити неповне загартування, так як цементит в структурі збільшить твердість металу.

У разі нагрівання вище рекомендованого інтервалу можливий перегрів сталі і зниження її властивостей. Для контролю температури в печі застосовуються пірометри. При відсутності пірометрів температуру орієнтовно можна визначати за кольорами розжарювання. Колір розжарювання сталі в залежності від температури, °С, змінюється наступним чином (рис. 1.20).

Початок світіння	530-580°		Світло-жовтий	220°	
Темно-червоний	580-650°		Солом'яно-жовтий	230°	
Темно-вишневий	650-720°		Золотаво-жовтий	240°	
Вишневий	720-780°		Коричневий	255°	
Світло-вишневий	780-830°		Коричнево-червоний	265°	
Червоний	830-900°		Фіолетово-синій	285°	
Світло-червоний	900-1050°		Темно-синій	295-310°	
Жовтий	1050-1150°		Світло-синій	315-325°	
Світло-жовтий	1150-1250°		Сірий	330°	
Білий	1250-1300° і вище				

Рисунок 1.20 – Кольори розжарювання (а) і мінливості (б)

Час витримки сталі при температурі гарту має бути достатнім для того, щоб забезпечити утворення однорідного аустеніту по всьому перерізу.

Час нагріву і витримки виробів з вуглецевої сталі залежить від температури, нагріву середовища, що нагріває, і форми виробів.

У таблиці 1.2 наведено умови нагріву сталі при термічній обробці в лабораторних електричних печах.

Швидкість охолодження при загартуванні впливає на структуру і властивості сталі. Для отримання структури мартенситу в вуглецевих сталях необхідно охолодження зі швидкістю 400 – 600 °С в секунду в інтервалі 600 – 400 °С. Зниження швидкості призводить до появи структури трооститу (200 °С в 1 с) і сорбіту (близько 100 °С в 1 с).

Таблиця 1.2 – Умови нагріву сталі при термообробці

Температура нагріву, °С	Час витримки, хв, на 1 мм товщини (діаметра) зразка в залежності від його форми			Температура нагріву, °С	Час витримки, хв, на 1 мм товщини (діаметра) зразка в залежності від його форми		
	циліндр	квадрат	пластина		циліндр	квадрат	пластина
500	2,5	3,8	5,0	800	1,0	1,5	2,0
600	2,0	3,0	4,0	900	0,8	1,2	1,6
700	1,5	2,2	3,0	1000	0,4	0,6	0,8

При загартуванні важливим є повільне охолодження сталі в інтервалі температур, при яких відбувається перетворення аустеніту в мартенсит (300 °С), так як безпосередній перехід аустеніту в мартенсит не вимагає великих швидкостей охолодження і, крім того, якщо перетворення аустеніту в мартенсит відбуватиметься при повільному охолодженні, то зміна його об'єму по перерізу протікає рівномірно і тим самим знижуються внутрішні напруження і деформації.

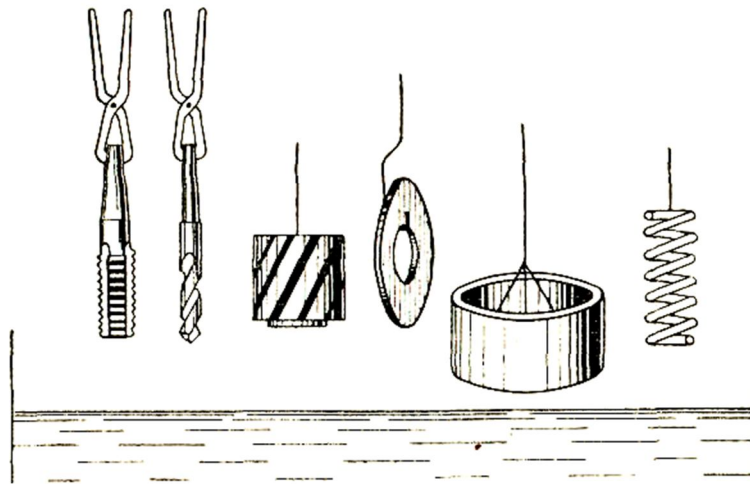
У таблиці 1.3 наведені швидкості охолодження, одержувані в деяких найбільш поширених охолоджуючих середовищах. Важливе значення при загартуванні має спосіб занурення виробу в охолоджуючу рідину (рис. 1.21).

Таблиця 1.3 – Швидкість охолодження сталі в охолоджуючих середовищах

Середовище гарту	Швидкість охолодження в інтервалі температур, град/с	
	650 – 550 °С	300 – 200 °С
Вода при температурі, °С:		
18	600	270
28	500	270
50	100	270
74	30	200
10%-й розчин у воді при 18 °С:		
їдкого натра	1200	300
повареної солі	1100	300
соди	800	270
Емульсія олії у воді	70	200
Олива:		
мінеральна машинна	150	30
трансформаторна	120	25
Спокійне повітря	18	

Неправильне занурення призводить до нерівномірного розподілу в металі внутрішніх напружень, що може викликати викривлення виробів, а також недостатню твердість його окремих частин. Вироби, що мають непрямі отвори, слід занурювати в охолоджуючу рідину закритою стороною, щоб повітря і пар могли вийти в отвори, а вода проникла в нього. Деталі, що мають увігнуту поверхню, не можна занурювати увігнутою поверхнею вниз, так як утворюється парова сорочка, що не дасть цьому місцю загартуватися. При загартуванні виробів, що мають неоднакові перерізи, спочатку занурюють в рідину найбільш масивні їх частини. Вироби плоскої форми слід занурювати в охолоджуюче середовище вузькою стороною.

*Відпуск* сталі проводиться після гарту, щоб зменшити крихкість, послабити напруження і отримати необхідні механічні властивості.



Рисинок 1.21 – Спосіб занурення виробу в охолоджуючу рідину

Температура нагріву сталі залежить від виду відпуску. Час витримки залежить від розмірів виробу і температури нагріву (табл. 1.2).

Велике застосування має відпуск за кольорами мінливості, які залежать від температури нагріву, °С:

*Метастабільні структури*

До метастабільних (нестійких) структур належать мартенсит, троостит, сорбіт і аустеніт.

*Мартенсит* має голчасту будову. Розміри голок залежать від температури, загартування і від розмірів зерен аустеніту, з яких вони утворилися, і їх кількості. Кращими механічними властивостями володіє дрібноголчастий мартенсит. У металомікроскопі мартенсит спостерігається у вигляді голок, розташованих під кутом 60, 90 і 120° один до одного.

*Троостит* є продуктом розпаду аустеніту при загартуванні, а при середньому відпуску — продуктом розпаду мартенситу. Троостит протравлюється реактивами інтенсивніше мартенситу, тому під мікроскопом він виглядає темним.

*Сорбіт* утворюється при високому відпуску загартованої на мартенсит сталі. Сорбіт видно під мікроскопом у вигляді світлих ділянок — зерен

цементиту в фериті. Аустеніт спостерігається у вигляді світлих полів або світлого фону. Залишковий аустеніт буває тільки в високовуглецевих і деяких легованих сталях після гарту.

### Запитання для самоперевірки:

1. Від чого залежать властивості сплаву?
2. Назвіть основні види термічної обробки?
3. Як розрізняють різновиди відпалу I роду?
4. Що розуміють під відпалом II роду?
5. Дайте визначення гарту.
6. Дайте визначення відпуску.
7. Що розуміють під хіміко-термічною обробкою?
8. Що розуміють під термомеханічною обробкою?
9. Що лежить в основі всіх перетворень, які відбуваються в сталі при нагріванні?
10. Поясніть вплив швидкості нагріву на тривалість перетворення?

### Форма звіту

#### Практична робота №1. Термічна обробка сталей

1. По таблиці завдань знайти свій варіант.
2. Вивчити теоретичні відомості термічної обробки сталей.
3. Визначити режим загартування зразка сталі відповідно до завдання.
4. Визначити режим низького, середнього і високого відпуску зразків сталі відповідно до завдання.
5. Вказати твердість зразків після гарту.
6. Вказати твердість зразків після відпуску.
7. Охарактеризувати структуру сталі після виконаних різних видів термічної обробки.
8. Зробити аналіз впливу термічної обробки сталі на її механічні властивості.
9. Виконати аналіз впливу термічної обробки сталі на її механічні властивості.

#### Протокол випробувань

№ зразка	Марка сталі	Загартування			Твердість HRC	Відпуск			Твердість HRC
		температура нагріву, °C	витримка, хв	охолоджувальне середовище		температура нагріву, °C	витримка, хв	охолоджувальне середовище	
1									

**Таблиця завдань**

Номер завдання	Марка сталі	Необхідна структура
1	У 12	мартенсит
2	12Х18Н10Б	троостит
3	12Х18Н10Т	сорбіт
4	30ХГС	перліт
5	14Г2АФ	бейніт
6	Р6М5	перліт + цементит
7	03Н18К9М5Т	ферит + перліт
8	95Х18	мартенсит
9	08Х13	троостит
10	ШХ15	сорбіт
11	36Х2Н2МФА	перліт
12	25Н25М4Г1	бейніт
13	Р18	мартенсит
14	12Х1МФ	троостит
15	30Х9Н8М4Г2С2	сорбіт
16	40ХН2МА	перліт
17	04Х11Н9М2Д2ТЮ	бейніт
18	30ХГСН2А	мартенсит
19	ШХ15СГ	троостит
20	09Х14Н19В2БР	сорбіт
21	65С2ВА	перліт
22	60С2Н2А	бейніт
23	30Х10Г10	мартенсит
24	40Х13	троостит
25	09Х15Н8Ю	сорбіт

## 2 ВИВЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ПОЛІМЕРНИХ ПЛАСТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

**Мета роботи** — ознайомитися з технологіями отримання полімерних пластичних матеріалів.

### **Завдання:**

1. Ознайомитися з найважливішими класами захисних полімерних покриттів.
2. Вивчити вплив складу покриття.
3. Вивчити технології формування покриття на його властивості, структуру.

### **Короткі теоретичні відомості**

Полімерні молекули є великий клас сполук, основними відмітними характеристиками яких є велика молекулярна маса і висока конформаційна гнучкість ланцюга.

В даний час є безліч процесів і методів, основними з них є каландрування, виливка, пряме пресування, лиття під тиском, екструзія, пневмоформування, холодне формування, термоформування, спінювання, армування, формування з розплаву, сухе і мокре формування. Останні три методи використовують для виробництва волокон з волокноутворюючих матеріалів, а решта - для переробки пластичних і еластомірних матеріалів в промисловій виробі. Для більш детального ознайомлення з цими та іншими процесами, такими, як нанесення покриттів зануренням і методом вихрового напилення псевдозрідженим шаром, електронна і теплова герметизація і зварювання, слід звернутися до спеціальних підручників з переробки полімерів.

### **2.1 Полімери і полімерні матеріали**

#### 2.1.1 Загальна характеристика і класифікація

Полімером називається органічна речовина, довгі молекули якого побудовані з однакових багаторазово повторюваних ланок — мономерів. За походженням полімери діляться на три групи.

*Природні* утворюються в результаті життєдіяльності рослин і тварин і містяться в деревині, вовні, шкірі. Це протеїн, целюлоза, крохмаль, шелак, лігнін, латекс.

Зазвичай природні полімери піддаються операціям виділення очищення, модифікації, при яких структура основних ланцюгів залишається незмінною. Прикладами є натуральний каучук, виготовлений з латексу, целулоїд, що являє собою нітроцелюлозу, пластифіковану камфорою для підвищення еластичності. Продуктом такої переробки є *штучні* полімери.

За хімічною структурою полімери діляться на: лінійні, розгалуджені, сітчасті і просторові.

Молекули лінійних полімерів хімічно інертні по відношенню один до одного і пов'язані між собою лише силами Ван-дер-Ваальса. При нагріванні в'язкість таких полімерів зменшується і вони здатні оборотно переходити спочатку у високоеластичний, а потім і в в'язкотекучий стан (рис. 2.1).

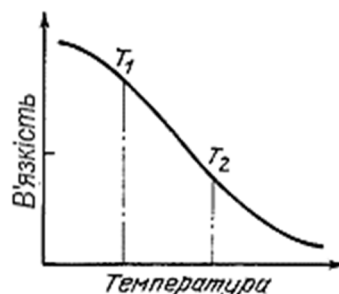


Рисунок 2.1 – Схематична діаграма в'язкості термопластичних полімерів в залежності від температури:  $T_1$  – температура переходу зі склоподібного у високоеластичний стан,  $T_2$  – температура переходу з високоеластичного у в'язкотекучий стан

Оскільки єдиним наслідком нагріву є зміна пластичності, лінійні полімери називають *термопластичними*. Термін «лінійні» не означає прямолінійні, а, навпаки, для них більш характерна зубчаста або спіральна конфігурація, що дає таким полімерам механічну міцність.

Термопластичні полімери можна не тільки плавити, а й розчиняти, так як зв'язки Ван-дер-Ваальса легко рвуться під дією реагентів.

**Розгалужені** (щеплені) полімери міцніші, ніж лінійні. Контрольоване розгалуження ланцюгів служить одним з основних промислових методів модифікації властивостей термопластичних полімерів.

**Сітчаста структура** характерна тим, що ланцюги пов'язані один з одним, а це сильно обмежує рух і призводить до зміни як механічних, так і хімічних властивостей. Звичайна гума м'яка, але при вулканізації сіркою утворюються ковалентні зв'язки типу S-0, і міцність зростає. Полімер може набути сітчасту структуру і спонтанно, наприклад, під дією світла і кисню станеться старіння із утратою еластичності і працездатності. Якщо молекули полімеру містять реакційно-здатні групи, то при нагріванні вони з'єднуються безліччю міцних поперечних зв'язків, полімер виявляється зшитим, тобто набуває **просторову структуру**. Таким чином, нагрівання викликає реакції, що різко і необоротно змінюють властивості матеріалу, який набуває міцність і високу в'язкість, стає нерозчинним і неплавким. Внаслідок великої реакційної здатності молекул, яка проявляється при підвищенні температури, такі полімери називають *терморективними*.

Термопластичні полімери отримують по реакції полімеризації, що протікає по схемі  $nM \rightarrow M_n$  (рис. 2.2), де  $M$  — молекула мономеру,  $M_n$  — макромолекула, що складається з мономерних ланок,  $n$  — ступінь полімеризації.



При ланцюговій полімеризації молекулярна маса наростає майже миттєво, проміжні продукти нестійкі, реакція чутлива до присутності домішок і вимагає, як правило, високого тиску. Не дивно, що такий процес у природних умовах неможливий, і всі природні полімери утворились іншим шляхом. Сучасна хімія створила новий інструмент — реакцію полімеризації, а завдяки чому великий клас термопластичних полімерів.

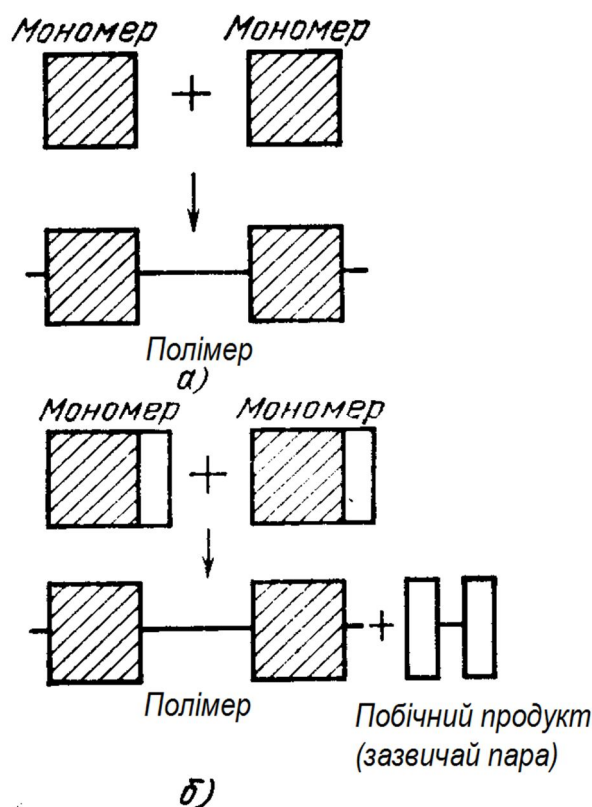


Рисунок 2.2 – Реакції утворення полімерів:  
а) полімеризація, б) поліконденсація

Реакція полімеризації реалізується лише в складній апаратурі спеціалізованих виробництв, і термопластичні полімери споживач отримує в готовому вигляді.

Реакційно-здатні молекули термореактивних полімерів можуть утворитися простішим і природним шляхом — поступово від мономеру до димеру, потім до тримеру, тетрамеру тощо. Таке об'єднання мономерів, їх «конденсацію», називають реакцією поліконденсації; вона не вимагає ні високої чистоти, ні тисків, але супроводжується зміною хімічного складу, а часто і виділенням побічних продуктів (зазвичай водяної пари, рис. 2.2). Саме ця реакція реалізується в природі; вона може бути легко здійснена за рахунок лише невеликого нагрівання в найпростіших умовах.

Незалежно від виду і складу вихідних речовин і способів отримання матеріали на основі полімерів можна класифікувати наступним чином: пластмаси, волокніти, шаруваті пластики, плівки, покриття, клеї.

## 2.1.2 Пластики

Слово «пластик» походить з грецької мови і означає матеріал, який може бути спресований або сформований в будь-яку форму за вибором. Відповідно до цієї етимології навіть глину можна було б назвати пластиком, проте насправді пластиками називають лише вироби із синтетичних матеріалів. Американське товариство випробувань і матеріалів визначає, що таке пластик, в такий спосіб: «це будь-який представник широкого кола різноманітних матеріалів, повністю або частково органічних за складом, якому можна надати необхідну форму при впливі температури і (або) тиску».

Відомі сотні пластиків. У таблиці 2.1 представлені основні їх види і наведені окремі представники кожного з видів. Слід зазначити, що в даний час не існує єдиного способу опису всього розмаїття пластиків через їхню численність.

Таблиця 2.1 – Основні типи пластиків

Тип	Типові представники	Тип	Типові представники
Акрилові пластики Амінопластики	Поліметилметакрилат (ПММА) Поліакрилонітрил (ПАН) Сечовиноформальдегідна смола Меламіноформальдегідна смола	Полефіри	Ненасичені поліефірні смоли Поліетилентерефталат (ПЕТФ) Поліетиленадипат
Целюлози	Етилцелюлоза Ацетат целюлози Нітрат целюлози	Поліолефіни Стирольні пластики	Поліетилен (ПЕ) Поліпропілен (ПП) Полістирол (ПС)
Епоксидні пластики	Епоксидні смоли		Співполімер стирола з акрилонітрилом
Фторопласти	Політетрафторетилен (ПТФЕ) Полівініліденфторид		Співполімер акрилонітрила зі стиролом і бутадієном (АБС)
Фенопласти	Фенолоформальдегідна смола Фенолофурфуролова смола	Вінілові пластики	Полівінілхлорид (ПВХ) Полівінілбутираль
Поліамідні пластики (нейлони)	Полікапролактан (ПА-6) Полігексаметиленадипамід (ПА-6,6)		Співполімер вінілхлорида з вінілацетатом

Першим термопластом, які знайшли широке застосування, був целулоїд — штучний полімер, отриманий шляхом переробки природного — целюлози. Він зіграв велику роль у техніці, особливо в кінематографі, але внаслідок виняткової пожежонебезпеки (за складом целюлоза дуже близька до бездимного пороху) вже в середині ХХ ст. її виробництво впало майже до нуля.

Розвиток електроніки, телефонного зв'язку, радіо настійно вимагало створення нових електроізоляційних матеріалів з хорошими конструкційними і технологічними властивостями. Так з'явилися штучні полімери, виготовлені на основі тієї ж целюлози, названі за першими літерами областей застосування етроли. У даний час лише 2 – 3 % світового виробництва полімерів складають целюлозні пластики, тоді як приблизно 75 % — синтетичні термопласти, причому 90 % з них припадає на частку лише

трьох: полістиролу, поліетилену, полівінілхлориду.

Полістирол спінюваний, наприклад, широко використовується як теплозвукоізоляційний будівельний матеріал. У радіоелектроніці він знаходить застосування для герметизації виробів, коли треба забезпечити мінімальні механічні напруження, створити тимчасову ізоляцію від впливу тепла, випромінюваного іншими елементами, або низьких температур і усунути їх вплив на електричні властивості, отже, — у бортовій і НВЧ-апаратурі.

### 2.1.3 Еластомери

Класичним прикладом еластомерів є природний каучук.

Макромолекула каучуку має спіральну будову з періодом ідентичності 0,913 нм і містить понад 1 000 ізопренових залишків. Будова макромолекули каучуку забезпечує його високу еластичність - найбільш важливу технічну властивість. Каучук має здатність оборотно розтягуватися до 900 % початкової довжини.

Різновидом каучуку є менш еластична гутаперча або балата — сік деяких каучуконосних рослин, які ростуть в Індії та на Малайському півострові. На відміну від каучуку молекула гутаперчі коротше і має транс-1,4-будову з періодом ідентичності 0,504 нм.

Видатне технічне значення натурального каучуку, відсутність його в ряді країн, економічно рентабельних джерел, прагнення мати матеріали, які переважають за низкою властивостей (масло-, морозостійкість, міцність до стирання) натуральний каучук, стимулювали дослідження щодо отримання синтетичного каучуку.

В даний час використовується кілька синтетичних еластомерів. Вони включають в себе полібутадієн, співполімери стиролу з бутадієном, акрилонітрилу з бутадієном (нітрильний каучук), поліізопрен, поліхлоропрен (неопрен), співполімер етилену з пропиленом, співполімер ізопрену з ізобутиленом (бутиловий каучук), поліфторвуглець, поліуретан і силіконові каучуки. Сировиною для отримання синтетичного каучуку за способом Лебедева служить етиловий спирт. Тепер розроблено отримання бутадієну з бутану через каталітичне дегідрування останнього.

Вчені добилися успіху і сьогодні більше однієї третини гуми, виробленої в світі, виготовляється з синтетичного каучуку. Каучук і гума внесли величезний внесок в технічний прогрес останнього сторіччя. Згадаймо хоча б про гумові чоботи і різноманітні ізоляційні матеріали, і стане зрозумілою роль каучуку в найважливіших галузях господарства. Більше половини світового виробництва еластомерів витрачається на виробництво шин. На виготовлення покришок для малолітражки потрібно близько 20 кг каучуку, причому різних сортів і марок, а для самоскида — майже 1 900 кг. Менша частина йде на інші види гумових виробів.

## 2.1.4 Волокна

За походженням волокнисті матеріали, що використовуються в промисловості, можуть бути поділені на три групи: природні, штучні і синтетичні. До природних матеріалів відносяться: рослинні (целюлозні) — бавовна і льон; мінеральні — азбест; тваринні — шовк і вовна. До штучних відносяться продукти переробки целюлози (віскозне і ацетатне волокна); продукти переробки мінеральної сировини (силікатне, скляне волокно). Останнім часом значно зросло застосування групи синтетичних волокнистих матеріалів (поліаміди, поліефіри, похідні етилену). З точки зору споживача волокна можуть бути трьох типів; повсякденного попиту, безпечні і промислові.

Волокна повинні мати відповідну міцність і розтяжність, м'якість, не горючістю, поглинати вологу і добре фарбуватися, жорсткими, міцними, довговічними і зносостійкими. З точки зору безпеки до цих волокон ставляться такі вимоги: вони повинні погано займатися, не розповсюджувати полум'я і при горінні виділяти мінімум тепла, диму та токсичних газів. При додаванні невеликих кількостей речовин, що містять такі атоми, як В, N, Si, Р, С1, Br або Sb, в волокна повсякденного попиту вдається надати їм вогнестійкі властивості і, таким чином, перетворити їх в безпечні волокна. Введення в волокна модифікуючих добавок зменшує їх горючість, знижує поширення полум'я, але не призводить до зменшення виділення токсичних газів і диму при горінні. Дослідження показали, що в якості безпечних волокон можуть бути використані ароматичні поліаміди, полііміди, полібензімідазоли і поліоксидіазоли. Однак при горінні цих волокон спостерігається виділення токсичних газів, оскільки в їх молекулах містяться атоми азоту. Цього недоліку позбавлені ароматичні поліефіри.

Промислові волокна використовуються в якості армуючих матеріалів у композитах. Ці волокна також називають структурними волокнами, оскільки вони володіють високим модулем, міцністю, термостійкістю, жорсткістю, довговічністю. Структурні волокна використовують для зміцнення таких виробів, як жорсткі і гнучкі труби, трубки і шланги, а також у композиційних структурах, званих волокнітами і застосовуваних у конструкціях кораблів, автомобілів, літаків і навіть будівель. До цього класу волокон відносяться одноосно орієнтовані волокна ароматичних поліамідів і поліефірів, вуглецеві та кремнійові волокна.

## 2.2 Переробка полімерів

### 2.2.1 Компаундування

Полімери в чистому вигляді, отримані з промислових підприємств після їх виділення і очищення, називаються «первинними» полімерами або «первинними» смолами. За винятком деяких полімерів, таких, як полістирол, поліетилен, поліпропілен, первинні полімери звичайно не придатні для

прямої переробки. Первинний полівінілхлорид, наприклад, є матеріалом рогоподібної фактури і не може бути сформований без попереднього пом'якшення шляхом додавання пластифікатора. Аналогічно цьому для формування натурального каучуку потрібно введення в нього вулканізуючого агента. Більшість полімерів захищають від термічної, окисної і фотодеструкції введенням в них відповідних стабілізаторів. Додавання в полімер барвників і пігментів перед формуванням дозволяє отримати вироби самих різноманітних кольорів. Для зменшення тертя і поліпшення ходу полімеру всередині переробного обладнання в більшість полімерів додають мастильні матеріали і речовини для поліпшення технологічних властивостей. Наповнювачі ж в полімер зазвичай додають для надання їм спеціальних властивостей і зменшення вартості кінцевого продукту.

Процес, що включає в себе введення таких інгредієнтів, як пластифікатори, вулканізуючі агенти, загусники, стабілізатори, наповнювачі, барвники, полум'ягасники і мастильні речовини, в первинний полімер, називають «компаундуванням», а суміші полімерів з цими добавками – «компаундами».

Первинні пластичні полімери, такі, як полістирол, поліетилен, поліметилметакрилат і полівінілхлорид, зазвичай знаходяться в вигляді сипучих дрібних порошків. Інгредієнти у вигляді дрібного порошку або рідини змішують з порошкоподібним первинним полімером з використанням планетарних міксерів, V-змішувачів, мішалок із стрічковою гвинтовою лопатою, Z-міксерів або перекидачів. Зсув можна проводити або при кімнатній, або при підвищеній температурі, яка, однак, повинна бути набагато нижче температури розм'якшення полімеру. Рідкі форполімери змішують з використанням простих високошвидкісних мішалок.

Первинні еластомерні полімери, такі, як натуральний каучук, бутадієнстірольний каучук або нітрильний каучук, одержують у вигляді крихти, спресованої в товсті пластини, звані «стосами». Вони, як правило, змішані з вулканізуючими агентами, каталізаторами, наповнювачами, антиоксидантами і мастильними матеріалами. Оскільки еластомери не є сипучими порошками, як первинні пластичні матеріали, їх не можна змішувати з названими вище інгредієнтами, використовуючи методи, що застосовуються для первинних пластиків. Змішання первинних пластичних полімерів з іншими компонентами компаунда досягається перемішуванням, тоді як отримання компаунда первинних еластомерів включає в себе вальцювання крихти в пластичні листи і подальше введення в полімер необхідних інгредієнтів. Компаундування еластомерів проводять або на двовальцовому каучуковому млині, або на змішувачі Бенбері з внутрішнім змішуванням. Еластомери у вигляді латексу або низькомолекулярних рідких смол можуть бути змішані простим перемішуванням з використанням високошвидкісних мішалок. У разі волокноутворюючих полімерів компаундування не проводять. Такі компоненти, як мастильні речовини, стабілізатори і наповнювачі, зазвичай безпосередньо вводять у розплав або

розчин полімеру безпосередньо перед прядінням нитки.

### 2.2.2 Технологія переробки

Полімерні матеріали використовують у самих різних формах, таких як стержні, труби, листи, пінопласти, покриття або адгезиви, а також як пресовані вироби, мається на увазі наявність різноманітних способів переробки полімерних компаундів у кінцеві продукти. Більшість полімерних виробів отримано або формуванням, або обробкою, або відливанням рідких форполімерів у формі з наступним отвердінням або зшиванням. Волокна отримують в процесі прядіння.

Процес формування можна порівняти, наприклад, із ліпленням будь-якої фігури з глини, а процес обробки — з вирізанням тієї ж фігури зі шматка мила. У процесі формування компаунд у вигляді порошку, лусочок або гранул поміщають у прес-форму і піддають дії температури і тиску, в результаті чого утворюється кінцевий продукт. В процесі обробки отримують вироби у вигляді простих форм, таких, як листи, стержні або труби, використовуючи штапелювання, штампування, склейку і зварювання.

Після формування термопластичних матеріалів під дією температури і тиску перед звільненням з прес-форми їх слід охолоджувати нижче температури розм'якшення полімеру, так як в протилежному випадку вони втрачають форму. У разі термореактивних матеріалів такої необхідності немає, оскільки після одноразового спільного впливу температури і тиску виріб зберігає придбану форму навіть при його звільненні з прес-форми за високої температури.

### 2.2.3 Каландрування

Процес каландрування застосовують для виробництва неперервних плівок і листів. Основною частиною апарату для каландрування є комплект гладко відполірованих металевих валків, що обертаються в протилежних напрямках, і пристрій для точного регулювання зазору між ними (рис. 2.3). Зазор між валками визначає товщину каландрованого листа. Полімерний компаунд подається на гарячі валки, а лист, що надходить з цих валків, охолоджується при проходженні через холодні валки. На останньому етапі листи змотуються в рулони. Однак якщо замість листів потрібно отримати тонкі полімерні плівки, застосовують серію валків із зазором між ними, який поступово зменшується. Зазвичай в листи каландрують такі полімери, як полівінілхлорид, поліетилен, каучук і співполімер бутадієну, стиролу і акрилонітрилу.

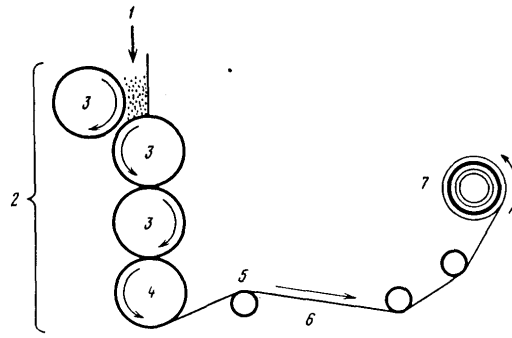


Рисунок 2.3 – Схема апарата для каландрування

1 – полімерний компаунд; 2 – каландрувальні валки: гарячі (3) і холодний (4);  
5 – каландрований лист; 6 – напрямлюючі валки; 7 – змотуючий пристрій

При використанні в каландрувальній машині профільованих валків можна отримувати тиснені листи різних малюнків. Різні декоративні ефекти, такі, як імітація під мармур, можуть бути досягнуті шляхом введення в каландр суміші компаундів різних кольорів. Технологія обробки під мармур зазвичай використовується у виробництві плиток для підлоги з полівінілхлориду.

#### 2.2.4 Лиття

**Лиття у формі.** Це порівняно недорогий процес, який полягає в переробці рідкого форполімеру у тверді вироби необхідної форми. Цим методом можуть бути отримані листи, труби, стержні і т.п. вироби обмеженої довжини. Схематично процес лиття в формі представлено на рисунку 2.4. У цьому випадку форполімер, змішаний в відповідних пропорціях із затверджувачем і іншими інгредієнтами, виливають у чашку Петрі, яка і служить формою. Потім чашку Петрі поміщають на кілька годин в піч, нагріту до необхідної температури, до повного завершення реакції затвердіння. Після охолодження до кімнатної температури твердий продукт виймають з форми. Тверде тіло, відлите таким чином, буде мати форму внутрішнього рельєфу чашки Петрі.

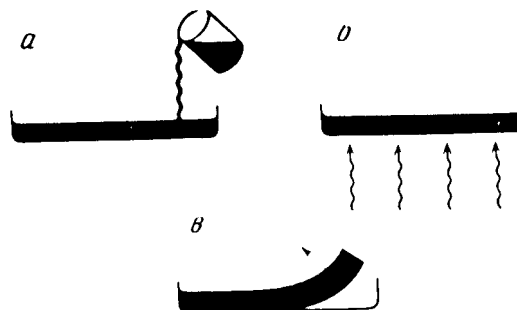


Рисунок 2.4 – Найпростіше зображення процесу лиття в формі:

а – наповнення чашки Петрі форполімером і затверджувачем;  
б – нагрівання в печі; в – виймання з форми остиглого продукту

Якщо замість чашки Петрі використовувати циліндричну скляну трубу, закриту з одного кінця, можна отримати виріб у вигляді циліндричного стержня. Крім того, замість форполімеру і затверджувача у формі можна вилити суміш мономера, каталізатора та інших інгредієнтів, нагрітих до температури полімеризації. Полімеризація в цьому випадку буде протікати всередині форми до утворення твердого продукту. Для лиття в формі підходять акрил, епоксиди, поліефіри, феноли і уретани.

Форми для лиття виготовляють з алебастру, свинцю або скла. У процесі затвердіння відбувається усадка полімерного блоку, що полегшує його звільнення з форми.

**Ротаційне лиття.** Порожні вироби, такі, як м'ячі і ляльки, отримують в процесі, званому «ротаційне лиття». Апарат, який використовується в цьому процесі, представлений на рисунку 2.5.

Компаунд термопластичного матеріалу у вигляді дрібного порошку поміщають в порожню форму. Використовуваний апарат має спеціальне пристосування для одночасного обертання форми навколо первинної і вторинної осей. Форму закривають, нагрівають і обертають. Це призводить до однорідного розподілу розплавленого пластику по всій внутрішній поверхні порожнистої форми. Потім обертову форму охолоджують холодною водою. При охолодженні розплавлений пластичний матеріал, однорідно розподілений по внутрішній поверхні форми, твердне. Тепер форму можна відкривати і вийняти кінцевий виріб.

Також у форму може бути завантажена рідка суміш термореактивного форполімеру із затверджувачем. Затвердіння в цьому випадку буде відбуватися при обертанні під дією підвищеної температури.

Ротаційним литтям виготовляють вироби з полівінілхлориду, такі, як калози, порожнисті кулі або голови для ляльок. Затвердіння полівінілхлориду здійснюється шляхом фізичного гелеутворення між полівінілхлоридом і рідким пластифікатором при температурах 150 – 200 °С. Дрібні частинки полівінілхлориду однорідно дисперговані в рідкому пластифікаторі разом із стабілізаторами і барвниками, утворюючи, таким чином, речовину з порівняно низькою в'язкістю. Цей пастоподібний матеріал, званий «пластизоль», завантажують у форму і відкачують з неї повітря. Потім форму починають крутити і нагрівати до необхідної температури, що призводить до гелеутворення полівінілхлориду. Товщина стінок продукту, що утворюється, визначається часом гелеутворення.



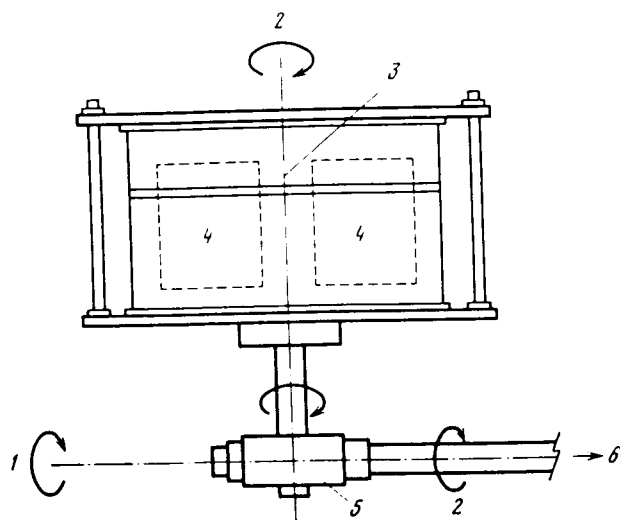


Рисунок 2.5 – Апарат для ротаційного лиття:

1 – первинна вісь; 2 – вторинна вісь; 3 – деталь роз’ємної форми;  
4 – порожнини форми; 5 – кожух зубчастої передачі; 6 – до мотору

Після досягнення необхідної товщини стінок надлишок пластизолу видаляється для проведення повторного циклу. Для остаточної гомогенізації суміші частинок полівінілхлориду з пластифікатором гелеподібний продукт всередині форми нагрівають. Кінцевий продукт виймають з форми після його охолодження струменем води. Метод ротаційного лиття з використанням рідкого матеріалу відомий як метод «формування порожніх виробів заливанням і обертанням форми».

**Лиття під тиском.** Найбільш зручним процесом для виготовлення виробів з термопластичних полімерів є процес лиття під тиском. Незважаючи на те, що вартість обладнання в цьому процесі досить висока, його безсумнівною перевагою є висока продуктивність. У цьому процесі дозована кількість розплавленого термопластичного полімера впорскується під тиском в порівняно холодну прес-форму, де і відбувається його затвердіння у вигляді кінцевого продукту.

Процес лиття під тиском схематично зображений на рисунку 2.6.

Процес складається з подачі компаундованого пластичного матеріалу у вигляді гранул, таблеток або порошку з бункера через певні проміжки часу в нагрітий горизонтальний циліндр, де і відбувається його розм’якшення. Гідравлічний поршень забезпечує тиск, необхідний для того, щоб проштовхнути розплавлений матеріал по циліндру в форму, розташовану на його кінці. При русі полімерної маси уздовж гарячої зони циліндра пристрій, який називається «торпедою», сприяє однорідному розподілу пластичного матеріалу по внутрішніх стінках гарячого циліндра, забезпечуючи таким чином рівномірний розподіл тепла по всьому об’єму. Потім розплавлений пластичний матеріал впорскують через литтєвий отвір у гніздо прес-форми.

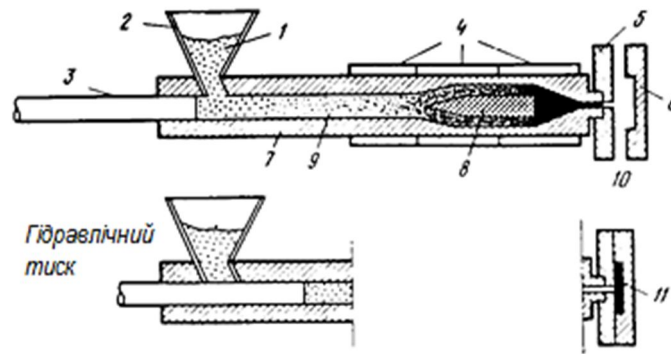


Рисунок 2.6 – Схематичне зображення процесу лиття під тиском:

1 – компаундований пластичний матеріал; 2 – завантажувальна воронка; 3 – поршень; 4 – електричний нагрівальний елемент; 5 – стаціонарна частина форми; 6 – рухома частина форми; 7 – основний циліндр; 8 – торпеда; 9 – розм'якшений пластичний матеріал; 10 – прес-форма; 11 – сформований виріб

У найпростішому вигляді прес-форма являє собою систему з двох частин: одна з частин рухома, інша — стаціонарна (див. рис. 2.6). Стаціонарна частина прес-форми фіксується на кінці циліндра, а рухома знімається і надівається на неї. За допомогою спеціального механічного пристрою прес-форма щільно закривається, і в цей час відбувається впорскування розплавленого пластичного матеріалу під тиском 1500 кг/см. Закриваючий механічний пристрій повинен бути зроблений таким чином, щоб витримувати високі робочі тиски. Рівномірний плин розплавленого матеріалу у внутрішніх областях прес-форми забезпечується її попереднім нагріванням до певної температури. Зазвичай ця температура трохи нижче температури розм'якшення пресованого пластичного матеріалу. Після заповнення форми розплавленим полімером її охолоджують холодною водою, що циркулює, а потім відкривають для вилучення готового виробу. Весь цей цикл може бути повторений багаторазово як у ручному, так і в автоматичному режимі.

**Виливка плівок.** Метод виливки використовують також і для виробництва полімерних плівок. У цьому випадку розчин полімеру відповідної концентрації поступово виливають на рухомий із постійною швидкістю металевий пояс (рис. 2.7), на поверхні якого і відбувається утворення безперервного шару полімерного розчину.

При випаровуванні розчинника в контрольованому режимі на поверхні металевого пояса відбувається утворення тонкої полімерної плівки. Після цього плівка знімається простим відшаровуванням. Цим способом отримують більшість промислових целофанових листів і фотографічних плівок.

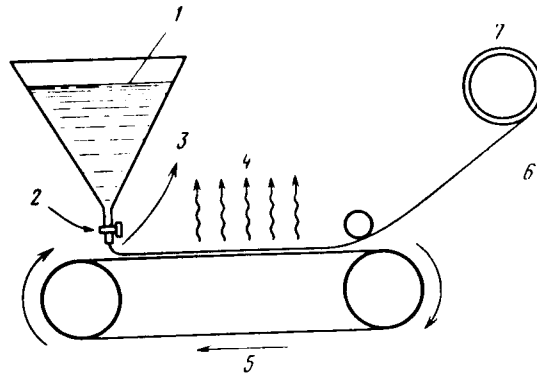


Рисунок 2.7 – Схема процесу виливки плівок:

- 1 – розчин полімеру; 2 – розподільний клапан; 3 – розчин полімеру розтікається з утворенням плівки; 4 – розчинник випаровується; 5 – нескінченний металевий пояс; 6 – безперервна полімерна плівка; 7 – змотувальна котушка

### 2.2.5 Пряме пресування

Метод прямого пресування широко використовується для виробництва виробів з термореактивних матеріалів. На рисунку 2.8 представлена типова прес-форма, яка використовується для прямого пресування. Форма складається з двох частин — верхньої і нижньої або з пуансона (позитивна форма) і матриці (негативна форма). У нижній частині прес-форми є виїмка, а у верхній — виступ. Зазор між виступом верхньої частини і виїмкою нижньої частини в закритій прес-формі і визначає кінцевий вигляд пресованого виробу.

У процесі прямого пресування термореактивний матеріал піддається одноразовому впливу температури і тиску. Застосування гідравлічного преса з пластинами, що нагріваються, дозволяє отримати бажаний результат.

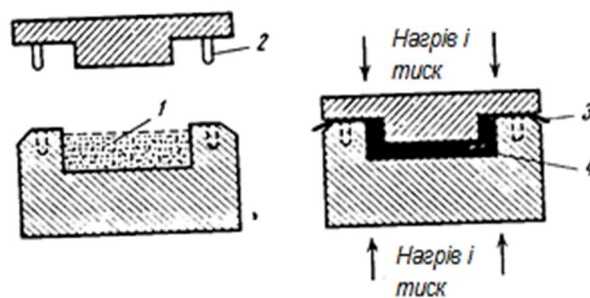


Рисунок 2.8 – Схематичне зображення прес-форми, використовуваної в процесі прямого формування:

- 1 – порожнина форми, наповнена термореактивним матеріалом; 2 – направляючі шипи; 3 – задріка; 4 – сформований виріб

Температура і тиск при пресуванні можуть досягати 200 °С і 70 кг/см<sup>2</sup> відповідно. Робочі температура і тиск визначаються реологічними, термічними та іншими властивостями пресованого пластичного матеріалу.

Виймка прес-форми повністю заповнюється полімерним компаундом. Коли під тиском прес-форма закривається, матеріал всередині неї стискається і пресується в необхідну форму. Надмірний матеріал витісняється з прес-форми в вигляді тонкої плівки, яку називають «задирка». Під дією температури маса, що пресується, твердне. Для звільнення кінцевого продукту з прес-форми охолодження не потрібне.

## 2.2.6 Формування

**Пневмоформування.** Велика кількість порожніх пластичних виробів виготовляють методом пневмоформування: канистри, м'які пляшки для напоїв та ін. Пневмоформуванню можуть бути піддані такі термопластичні матеріали: поліетилен, полікарбонат, полівінілхлорид, полістирол, нейлон, поліпропілен, акрил, акрилонітрил, акрилонітрил-бутадієнстирольний полімер, проте за щорічного споживання перше місце займає поліетилен високої щільності.

Пневмоформування веде своє походження від складувної промисловості. Схема цього процесу подано на рисунку 2.9.

Гарячу розм'якшену термопластичну трубку, звану «заготовкою», поміщають всередину порожнистої форми, що складається з двох частин. Коли форма закрита, обидві її половини затискають один кінець заготовки та голку для подачі повітря, розташовану на іншому кінці трубки.

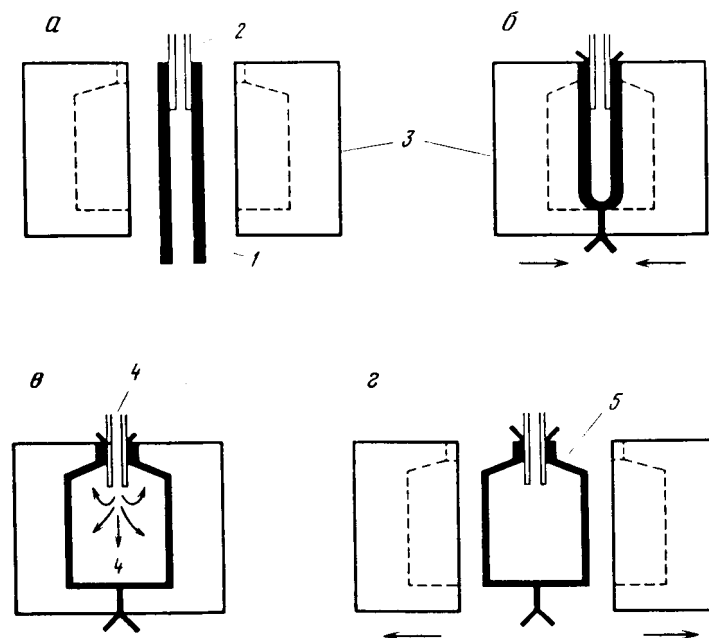


Рисунок 2.9 – Схематична діаграма процесу пневмоформування:  
*а* – заготовка, вміщена у відкриту прес-форму; *б* – закрита прес-форма;  
*в* – вдування повітря в прес-форму; *г* – відкривання прес-форми;  
*1* – заготовка; *2* – голка для подачі повітря; *3* – прес-форма; *4* – повітря;  
*5* – кінцевий виріб

Під дією тиску, що подається з компресора через голку, гаряча заготовка роздувається як куля до щільного зіткнення з відносно холодною внутрішньою поверхнею форми. Потім форму охолоджують, відкривають і виймають готовий твердий термопластичний виріб.

Заготовка для пневмоформування може бути отримана методом лиття під тиском або екструзії, і в залежності від цього метод називають відповідно литтям під тиском з раздувкою або пневмоформуванням з екструзією.

**Формування листових термопластів.** Формування листових термопластів є надзвичайно важливим процесом для виробництва тривимірних виробів з пластиків. Цим методом з листів акрилонітрилбутадиєнстиролу отримують навіть такі великі вироби, як корпуси підводних човнів.

Схема цього процесу наступна. Термопластичний лист нагрівають до температури його розм'якшення. Потім пуансон випресовує гарячий гнучкий лист у матрицю металевої прес-форми (рис. 2.10), при цьому лист приймає певну форму. При охолодженні сформований виріб твердне і його вилучають із прес-форми.

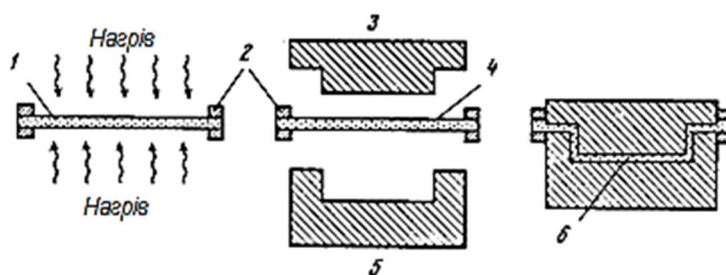


Рисунок 2.10 – Схема процесу формування листових термопластів:

- 1 – лист термопластичного матеріалу; 2 – затиск; 3 – пуансон;
- 4 – розм'якшений нагріванням лист; 5 – матриця; 6 – виріб

У модифікованому методі під дією вакууму гарячий лист засмоктується в порожнину матриці та приймає необхідну форму (рис. 2.11). Цей метод називається методом вакуумного формування.

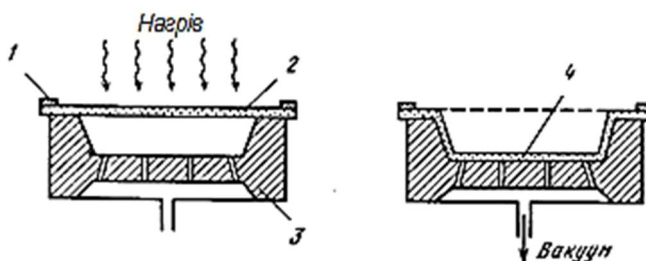


Рисунок 2.11 – Схема процесу вакуумного формування термопластів:

- 1 – зажим; 2 – лист термопласту; 3 – прес-форма; 4 – виріб

## 2.2.7 Екструзія

Екструзія є одним з найдешевших методів виробництва широко поширених пластичних виробів, таких, як плівки, волокна, труби, листи, стержні, шланги і ремені, причому профіль цих виробів задається формою вихлопного отвору головки екструдера. Розплавлений пластик при певних умовах видавлюють через вихідний отвір головки екструдера, що і надає бажаний профіль екструдату.

Схема найпростішої екструзійної машини показана на рисунку 2.12.

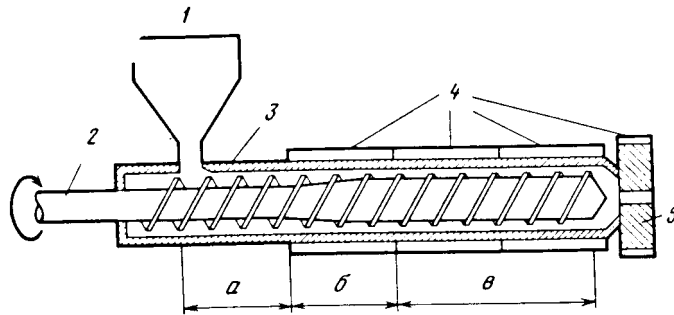


Рисунок 2.12 – Схематичне зображення найпростішої екструзійної машини:

- 1 – завантажувальна воронка; 2 – шнек; 3 – основний циліндр;
- 4 – нагрівальні елементи; 5 – вихідний отвір головки екструдера;
- а – зона завантаження; б – зона стиснення; в – зона гомогенізації

У цій машині порошок чи гранули компаундованого пластичного матеріалу завантажують з бункера в циліндр з електричним нагрівом для розм'якшення полімеру. Спіралевидний шнек, що обертається, забезпечує рух гарячої пластичної маси по циліндру. Оскільки при русі полімерної маси між обертовим шнеком і циліндром виникає тертя, це призводить до виділення тепла і, отже, до підвищення температури полімеру, який переробляється. У процесі цього руху від бункера до вихідного отвору головки екструдера пластична маса переходить три чітко розділені зони: зону завантаження (а), зону стиснення (б) і зону гомогенізації (в) (див. рис. 2.12).

Кожна з цих зон вносить свій вклад у процес екструзії. Зона завантаження, наприклад, приймає полімерну масу з бункера і направляє її в зону стиснення, ця операція проходить без нагрівання.

У зоні стиснення нагрівальні елементи забезпечують плавлення порошкоподібного завантаження, а шнек, який обертається, здавлює її. Потім пастоподібний розплавлений пластичний матеріал надходить в зону гомогенізації, де і набуває постійну швидкість течії, зумовлену гвинтовою нарізкою шнека. Під дією тиску, створюваного в цій частині екструдера, розплав полімеру подається на вихідний отвір головки екструдера і виходить з нього з бажаним профілем. Через високу в'язкість деяких полімерів іноді потрібна наявність ще однієї зони, яка називається робочою, де полімер піддається впливу високих зсувних навантажень для підвищення ефективності змішування. Екструдований матеріал необхідного профілю

виходить з екструдера в сильно нагрітому стані (його температура становить від 125 °С до 350 °С), і для збереження форми потрібно його швидко охолодження. Екструдат надходить на конвеєрну стрічку, що проходить через чан з холодною водою, і твердне. Для охолодження екструдата також застосовують обдування холодним повітрям і зрошення холодною водою. Сформований продукт у подальшому або розрізається, або змотується в котушки.

Процес екструзії використовують також для покриття дротів і кабелів полівінілхлоридом або каучуком, а стрижнеподібних металевих прутів — підходящими термопластичними матеріалами.

### 2.2.8 Спінювання

Спінювання є простим методом отримання піно- і губкоподібних матеріалів. Особливі властивості цього класу матеріалів — амортизуюча здатність, легка вага, низька теплопровідність — роблять їх дуже привабливими для використання в різних цілях. Звичайними спінюваними полімерами є поліуретани, полістирол, поліетилен, поліпропілен, силікони, епоксиди, ПВХ та ін. Спінена структура складається з ізольованих (закритих) або взаємопроникаючих (відкритих) порожнин. У першому випадку, коли порожнини закриті, вони можуть містити в собі газу. Обидва типи структур схематично представлені на рисунку 2.13.

Існує кілька методів для виробництва спінених або пористих пластиків. Один з них полягає в тому, що через розплавлений компаунд продувають повітря або азот до його повного спінювання. Процес спінювання полегшується при додаванні поверхнево-активних агентів. Після досягнення необхідного ступеня спінювання матрицю охолоджують до кімнатної температури. В цьому випадку термопластичний матеріал твердне у спіненому стані.

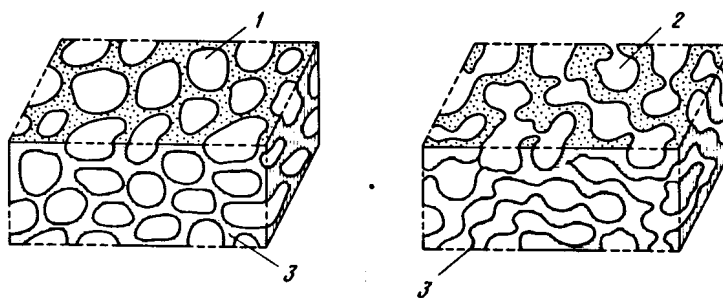
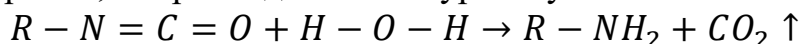


Рисунок 2.13 – Схематичне зображення пористих структур відкритого і закритого типів, що утворюються в процесі спінювання:

1 – дискретні (закриті) осередки; 2 – взаємопроникаючі (відкриті) осередки;  
3 – стінки осередків.

Термореактивні рідкі форполімери можуть бути спінені в холодному стані, а потім нагріті до повного їх затвердіння. Зазвичай спінювання досягається додаванням в полімерну масу піно- або газоутворювачів. Такими агентами є низькомолекулярні розчинники чи певні хімічні з'єднання.

Процес кипіння таких розчинників, як н-пентан і н-гексан, при температурах затвердіння полімерних матеріалів супроводжується інтенсивним процесом пароутворення. З іншого боку, деякі хімічні сполуки при цих температурах можуть розкладатися з виділенням інертних газів. Так, азо-біс-ізобутіронітрил термічно розкладається, звільняючи при цьому великий об'єм  $CO_2$ , що виділяється в полімерну матрицю в результаті протікання реакції між ізоціанатом і водою, також використовується для виробництва спінених матеріалів, наприклад піни поліуретану:



Оскільки поліуретани отримують по реакції поліола з діізоціанатом, то для спінювання продукту реакції необхідно додавання додаткових невеликих кількостей діізоціанату і води.

Отже, велика кількість парів або газів, що виділяються піно- і газоутворювачами, призводить до спінювання полімерної матриці. Полімерну матрицю у спіненому стані охолоджують до температур нижче температури розм'якшення полімеру (в разі термопластичних матеріалів) або піддають реакції затвердіння або зшивання (в разі термореактивних матеріалів), в результаті матриця набуває жорсткість, необхідну для збереження спіненої структури. Цей процес називається процесом «стабілізації піни». Якщо матрицю не охолоджувати нижче температури розм'якшення або не зшивати, здатні наповнити її гази залишають систему пор і піна колапсує.

Пінопласти можуть бути отримані в гнучкій, жорсткій і напівжорсткій формах. Для того щоб отримати вироби з пінопласту безпосередньо, спінювання слід проводити безпосередньо всередині прес-форми. Пінопластові листи і стержні також можуть бути використані для виготовлення різних виробів. Залежно від природи полімеру і ступеня спінювання щільність пінопластів може становити від 20 до 1 000 кг/см<sup>3</sup>. Використання пінопластів дуже різноманітне. Наприклад, автомобільна промисловість використовує великі кількості пінопластів з ПВХ і поліуретану для оббивки. Велику роль ці матеріали грають і при виготовленні меблів. Жорсткі полістирольні пінопласти широко використовуються для упаковки і теплоізоляції будівель. Піногуми і пінополіуретани використовують для набивання матраців та ін. Жорсткі пінополіуретани також застосовуються для теплоізоляції будівель і для виготовлення протезів.

## 2.2.9 Армування

При армуванні пластичної матриці високоміцним волокном отримують системи, звані «армовані волокном пластики» (АВП). АВП володіють дуже цінними властивостями: їх відрізняє високе відношення міцності до ваги, значна корозійна стійкість і простота виготовлення. Методом армування волокнами вдається отримувати широке коло виробів. Наприклад, конструкторів, творців космічних кораблів при створенні штучних



супутників в АВП насамперед привертає різке високе відношення міцності до ваги. Гарний зовнішній вигляд, невелика вага і корозійна стійкість дозволяють використовувати АВП для обшивки морських судів. Крім того, АВП використовують навіть в якості матеріалу для танків, в яких зберігають кислоти.

Зупинимося тепер докладніше на хімічному складі і фізичній природі цих незвичайних матеріалів. Як було зазначено вище, вони представляють собою полімерний матеріал, спеціальні властивості якого обумовлені введенням в нього армуючих волокон. Основними матеріалами, з яких виготовляють армуючі волокна (як дрібно нарізані, так і довгі), є скло, графіт, алюміній, вуглець, бор і берилій. Останні досягнення в цій галузі пов'язані з використанням в якості армуючих волокон повністю ароматичного поліаміду, що забезпечує зменшення ваги більш ніж на 50 % в порівнянні з армованими пластиками на основі традиційних волокон. Для армування також використовуються і натуральні волокна, такі, як азбест і ін. Вибір армуючого волокна насамперед визначається вимогами, що висуваються до кінцевого продукту. Однак скляні волокна залишаються і до цього дня широко використовуваними і досі вносять основний вклад у промислове виробництво АВП. Найбільш привабливими властивостями скляних волокон є низький коефіцієнт термічного розширення, висока стабільність розмірів, низька вартість виробництва, висока міцність при розтягуванні, низька діелектрична константа, негорючість і хімічна стійкість. Інші армуючі волокна використовують в основному в тих випадках, коли потрібні деякі додаткові властивості для експлуатації АВП у специфічних умовах, незважаючи на їх більш високу вартість у порівнянні зі скляними волокнами.

АВП отримують шляхом зв'язування волокон з полімерної матрицею і її подальшого затвердіння під дією тиску і температури. Армуючі добавки можуть бути у вигляді дрібно порізаних волокон, довгих ниток і тканин. Основними полімерними матрицями, що використовуються в АВП, є поліефіри, епоксиди, феноли, силікони, меламін, похідні вінілу і поліаміди. Більшість АВП отримують на основі поліефірних полімерів, головне достоїнство яких складає їх низька вартість. Фенольні полімери використовують у тих випадках, коли потрібна висока термостійкість. Надзвичайно високі механічні властивості АВП набувають при використанні в якості полімерної матриці епоксидних смол. Використання силіконових полімерів надає АВП чудові електричні і термічні властивості.

В даний час існує декілька методів армування пластиком. Найбільш часто використовуваними з них є: 1) метод нашарування листів вручну, 2) метод намотування волокна і 3) метод просочення розпиленням.

**Метод нашарування листів вручну.** Цілком ймовірно, що це найпростіший метод армування пластиків. У цьому випадку якість кінцевого продукту багато в чому визначається вмінням і майстерністю оператора. Весь процес складається з наступних стадій. Спочатку форму покривають тонким шаром адгезійного мастила на основі полівінілового спирту, силіконового

масла або парафіну. Це робиться для запобігання прилипання кінцевого виробу до форми. Потім форму покривають шаром полімеру, поверх якого кладуть склотканину або мат. Цю склотканину, в свою чергу, покривають іншим шаром полімеру. Все це для однорідного притискання склотканини до полімеру і видалення бульбашок повітря щільно прокочують роликками. Кількість шарів полімеру і склотканини, що чергуються, визначає товщину зразка (рис. 2.14).

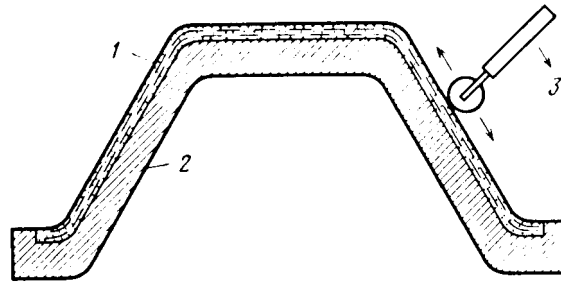


Рисунок 2.14 – Схематичне зображення методу нашарування листів вручну:  
1 – шари полімеру і склотканини; 2 – прес-форма; 3 – ролик, що прокочує

Потім при кімнатній або підвищеній температурі відбувається затвердіння системи. Після затвердіння армований пластик знімають з форми і проводять зачистку і остаточну обробку. Цим методом отримують листи, частини автомобільного кузова, корпуси для судів, труби і навіть фрагменти будівель.

**Метод намотування волокон.** Цей метод дуже широко використовується для виробництва таких армованих пластичних виробів, як циліндри, які витримують високі тиски, цистерни для зберігання хімічних речовин і корпуси моторів ракет. Він полягає в тому, що безперервну мононитку, волокно, пучок волокон або ткану стрічку пропускають через ванну зі смолою і затверджувачем (рис. 2.15). У міру виходу волокна з ванни надлишок смоли віджимається. Просочені смолою волокна або стрічку потім намотують на осердя необхідної форми і змушують затвердіти під дією температури.

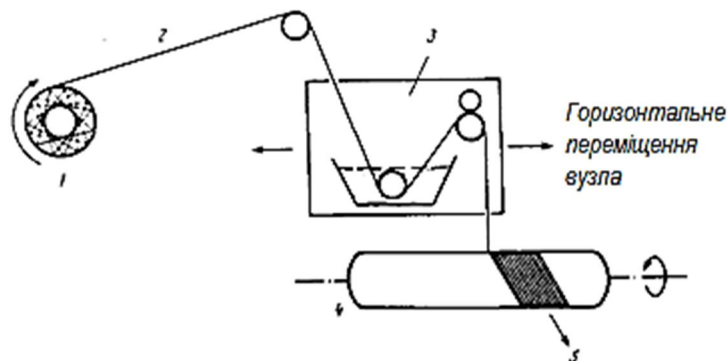


Рисунок 2.15 – Схематичне зображення методу намотування волокна:  
1 – котушка, яка подає; 2 – безперервна нитка; 3 – вузол для просочення  
волокна і віджиму смоли; 4 – осердя; 5 – просочені смолою волокна,  
намотані на осердя

Намотувальна машина (рис. 2.15) сконструйована так, щоб волокна могли намотуватися на осердя певним чином. Натяг волокна і спосіб його намотування дуже важливі з точки зору кінцевих деформаційних властивостей готового виробу.

**Метод обприскування.** У цьому методі використовують пульверизатор з багатострумковою головкою. Струмені смоли, затверджувача і нарізаного волокна одночасно подаються з пульверизатора на поверхню форми (рис. 2.16), де вони утворюють шар певної товщини.

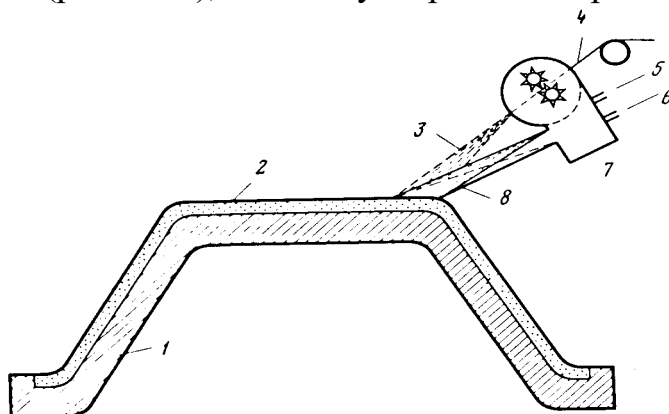


Рисунок 2.16 – Схематичне зображення методу обприскування:  
1 – форма; 2 – розпорошена суміш нарізаного волокна і смоли; 3 – струмінь нарізаного волокна; 4 – безперервне волокно; 5 – смола; 6 – затверджувач; 7 – вузол для нарізування волокна і розпилення; 8 – струмінь смоли

Нарізане волокно певної довжини отримують безперервною подачею волокон в подрібнювальну головку апарата. Після досягнення необхідної товщини полімерну масу при нагріванні піддають затвердінню. Розпилення є експрес-методом для покриття великих поверхонь. Багато сучасних пластичних виробів, таких як вантажні платформи, резервуари для зберігання, кузови вантажних автомобілів і корпуси кораблів, отримують саме цим методом.

### 2.3 Пластичні маси

Пластичні маси мають виняткове значення для розвитку різних галузей народного господарства і в першу чергу машинобудування. Вони є самостійним конструкційним матеріалом і мають ряд цінних технічних властивостей, яких не мають метали та інші природні матеріали. Впровадження в машинобудування нових синтетичних матеріалів з високою механічною міцністю і стійкістю до дії нафтопродуктів дозволяє виготовляти цілі вузли з пластмас, що веде до скорочення витрат металів і зменшує масу виробів.

### 2.3.1 Склад пластмас

Пластичними масами називаються матеріали, одержувані на основі штучних і природних смол, і їх суміші з різними наповнювачами.

За нормальних умов пластмаси є твердими або еластичними матеріалами. Під впливом температури і тиску пластмаси можуть переходити в пластичний стан, приймати і зберігати надану їм форму. Пластмаси за своїм складом бувають простими, якщо вони складаються з чистих зв'язуючих смол, або складними (композиційними), якщо в них, крім сполучної речовини, містяться і інші компоненти: наповнювачі, пластифікатори, змащувальні речовини, стабілізатори, барвники, каталізатори або прискорювачі.

*Речовина, що пов'язує (смола)*, визначає основні властивості пластмас. При виготовленні пластмас найбільш широко застосовують штучні смоли - продукти переробки кам'яного вугілля, нафти і інших матеріалів. Пластмаси, отримані на основі штучних смол, відносяться до полімерних сполук. Природні смоли (бурштин, шелак) і продукти переробки природних матеріалів (асфальт, каніфоль та ін.) застосовуються значно рідше.

*Наповнювачі* надають пластмасам певні фізико-механічні властивості і в багатьох випадках здешевлюють вартість пластмасових деталей.

Як наповнювачі використовуються органічні речовини: деревне борошно, деревний шпон, папір, тканини, бавовняні обчоси, стружка, тирса тощо, а також мінеральні речовини: кварцова мука, тальк, каолін, азбест, скловолокно, склотканина та ін.

*Пластифікатори* забезпечують пластмасам пластичність, збільшують текучість. У якості них використовуються дибутилфталат, трикрезилфосфат, камфора і т. п.

*Змащувальні речовини* запобігають прилипанню виготовленого виробу до форми. До них відносяться стеарин, віск і т. п.

*Стабілізатори* підвищують термостабільність і зв'язують побічні продукти. У якості них застосовують неорганічні (вода, фосфати) і органічні (амінокислоти) речовини.

*Барвники* (нітрозин і ін.) надають пластмасам необхідне забарвлення.

*Каталізатори* (вапно, окис магнію) скорочують час затвердіння.

### 2.3.2 Основні властивості пластмас

Пластмаси мають ряд цінних властивостей: високу електроізоляційну і хімічну стійкість, малу звуко- і теплопровідність, гарну водо-, морозо- і світлостійкість. Більшість пластмас стійкі до різних мінеральних масел і бензину. Вони у середньому в два рази легше алюмінію (питома вага від 0,9 до 1,8), мають високий опір стирання, добре працюють в умовах вібраційних навантажень, мають високу механічну міцність. Пластичні маси добре обробляються і здатні легко з'єднуватися з металами, тканинами, деревиною. Коефіцієнт тертя пластмас залежить від їх складу. Пластмаси з азбестовим

наповнювачем (асботекстоліт) є фрикційними матеріалами, а пластмаси з наповнювачем у вигляді бавовняної тканини (текстоліт) або деревного шпону, а також цілий ряд чистих смол, є антифрикційними матеріалами.

Всі ці властивості пластмас роблять їх дуже цінним конструкційним матеріалом. До недоліків пластмас можна віднести їх малу теплостійкість, яка лежить в межах 35 – 250 °С і залежить від типу застосовуваної смоли.

Залежно від поведінки пластичних мас при нагріванні вони поділяються на два класи: терморективні і термопластичні пластмаси (термопласти).

*Терморективними* називаються пластмаси, які під дією температури і тиску зазнають суттєвих хімічних змін і переходять у неплавкі і практично нерозчинні продукти, причому процес незворотній. Готові вироби, отримані з терморективних пластмас не вимагають охолодження при добуванні їх з пресформи і не піддаються повторному формуванню.

*Термопластичними* називаються пластмаси, які при нагріванні стають пластичними і тверднуть при охолодженні, зазнаючи при цьому хімічних змін, причому цей процес може бути повторений неодноразово.

При виготовленні машинобудівних деталей частіше застосовуються терморективні пластмаси, так як вони більш стабільні і міцні.

**Терморективні пластмаси.** До найважливіших представників терморективних пластмас відносяться фенопласти і амінопласти.

**Фенопласти.** Фенопласти являють собою композицію, що складається з фенолальдегідної смоли і наповнювача. Вироби з фенопластів відрізняються високою стабільністю властивостей; вони добре протистоять дії підвищеної температури, води, органічних розчинників, слабких розчинів лугів і кислот, мають діелектричні властивості. Недолік фенопластів – мала дугостійкість. Залежно від наповнювача розрізняють преспорошки, волокна і шаруваті пластики.

*Преспорошки* в якості наповнювача мають деревну муку, мікроазбест, каолін та ін.

*Волокна* — пресматеріал, наповнений бавовняними обчосами, має світло-коричневий або чорний колір, застосовується для низьковольтних електроізоляційних деталей; пресматеріал К-6 (наповнювач азбест) та скловолокно (наповнювач скловолокно) застосовуються для виробів з підвищеною механічною міцністю і нагрівостійкістю, зокрема для корпусної ізоляції колекторів електричних машин.

*Шаруваті пластмаси.* Шаруваті пластики на основі фенолальдегідних смол мають високу міцність. До шаруватих пластиків відносяться гетінакс, текстоліт, склотекстоліт, азботекстоліт.

*Гетінакс* — шаруватий пресований матеріал, що складається з двох або більше шарів паперу, просочених смолами. Використовується гетінакс як електроізоляційний матеріал.

*Текстоліт* — шаруватий пресований матеріал з бавовняної тканини, просоченої смолою; застосовується для виготовлення деталей, що працюють під навантаженням (шестерні, втулки, кільця), в якості антифрикційного

матеріалу для виготовлення підшипників ковзання, що працюють в різних, часто в дуже важких умовах, а також для деталей електроустаткування (електрощитки, панелі, клеми).

*Склотекстоліт* — шаруватий пресований матеріал, складається зі скляної тканини, покладеної правильними шарами і смоли; має високу міцність на розтягнення в межах 250 – 300 МН/м<sup>2</sup> (2 500 – 3 000 кгс/см<sup>2</sup>), високі діелектричні властивості, термо- і водостійкість. Склотекстоліт випускається у вигляді листів і плит товщиною від 0,5 до 30 мм. Застосовується для виготовлення пружних мембран, що працюють в гасі, і як електроізоляційний матеріал.

*Азботекстоліт* — пресований шаруватий пластичний матеріал зі спеціальної азбестової тканини, покладеної правильними шарами і просоченої спиртовим розчином феноло-формальдегіду. Застосовується як прокладочний матеріал, що працює в умовах підвищеної температури, і для виготовлення гальмівних пристроїв і деталей механізмів зчеплення.

**Амінопласти.** Амінопласти — пресувальні порошки, виготовлені з сечовино-формальдегідних смол і сульфатної целюлози (наповнювач), барвників і мастила. Вони здатні забарвлюватися в будь-який колір, світло- і кольоростійкі, не мають запаху, мають високу дугостійкість, тому застосовуються для виготовлення різних вимикачів.

**Термопластичні пластмаси.** До термопластичних пластмас на основі полімеризаційних смол відносяться: поліетилен, полівінілхлорид, полістирол, поліакрилові смоли (акрилати), поліамідні смоли і ін. Зазвичай вони випускаються як прості пластмаси (без наповнювача).

*Поліетилен* — безбарвний рогоподібний продукт, жирний на дотик, морозостійкий (від -60 °С до -65 °С), горючий, добре зберігає форму навіть при температурі +60 °С, механічно міцний, має високі діелектричні властивості, є найлегшою і найбільш водостійкою пластмасою. Застосовується поліетилен для ізоляції різних кабелів і проводів.

*Полівінілхлорид* має високу міцність, хімічно стійкий і має діелектричні властивості. Полівінілхлорид випускається як пластифікований (пластикати), так і без пластифікатора (вініласти) у вигляді листів, труб, плиток, стержнів і прутків.

*Вініпласт* як електроізоляційний матеріал знаходить застосування для гальванічних ванн і виготовлення баків кислотних і лужних акумуляторів.

*Полістирол* — безбарвна смола з хорошими антикорозійними властивостями, є типовим високочастотним діелектриком. Полістирол застосовується для ізоляції кабелів, як пресматеріал для виготовлення різних електроізоляційних деталей.

*Поліакрилові смоли.* До цієї групи належать полімери акрилової, метакрилової кислот, складних ефірів. Цінною технічною властивістю поліакрилатів є їх прозорість і безбарвність, а також здатність пропускати ультрафіолетові промені. Поліакрилові матеріали випускаються у вигляді листів органічного скла (авіаційне, світлотехнічне, товарне, виробне).

*Поліамідні смоли* випускаються шести типів: капрон, анід, смоли № 54,

№ 68, АК-7 і П-6. Найбільше застосування з них в машинобудуванні знаходить капрон, який починає витісняти кольорові метали, чавун і сталь.

*Капрон* (полікапролактан) являє собою тверду високоплавку смолу білого або світло-жовтого кольору, без запаху, з малою питомою вагою (1,13-1,15), температурою плавлення 212 – 215 °С. Капрон відрізняється винятковою стійкістю до лугів, стійкий до бензину, спирту, бензолу, гігроскопічний, але в той же час вода для нього є пластифікатором і надає йому еластичність. Капрон застосовується для виготовлення штучного волокна і технічних виробів (підшипників ковзання, шайб, втулок, зубчастих коліс, плівок, стрічок). Діелектричні властивості капрону залежать від вмісту вологи, тому в електротехніці рекомендується застосовувати капрон, коли потрібна висока стійкість до масел, високих температур і ударних навантажень.

До пластичних мас на основі природних смол відносяться вироби, виготовлені на основі ефірів целюлози. Найбільш поширеним видом таких пластиків є целулоїд, широко використовуваний для виробництва виробів народного споживання.

На основі асфальтів, бітумів і пісків виготовляються пластмаси чорного кольору, що застосовуються для виготовлення акумуляторних баків, електро- і термоізоляційних виробів.

### 2.3.3 Способи отримання виробів з пластмас

Переробка пластмас у вироби здійснюється одним із таких способів: екструзією, литтям під тиском, формуванням в прес-формах, зварюванням, склеюванням, механічною обробкою.

На вибір способу впливає вид пластмаси (термореактивні або термопластичні), конфігурація і геометричні розміри виробу, в'язкість або *плинність* пластмаси і т. д.

*Екструзією* (формування видавлюванням) отримують вироби з термопластів у вигляді нескінченних труб, стержнів, стрічок і т. п. На черв'ячних пресах (екструдерах).

Вихідні матеріали, що завантажуються в прес через бункер, нагріваються за допомогою вмонтованих в прес водяних, парових або електричних нагрівачів, перемішуються і нагнітаються шнеком в формоутворювальний мундштук. Виріб, що виходить із преса, охолоджується повітрям або водою і розрізається на частини потрібної довжини.

*Лиття під тиском* — спосіб формування виробів з термопластів у в'язкотекучому стані в ливарних машинах.

Вихідний матеріал з бункера через дозатор надходить певними порціями в циліндр машини, який обігрівается. Розігрітий до в'язкотекучого стану матеріал подається поршнем через сопло циліндра в прес-форму, заповнює її порожнину і витримується в ній протягом деякого часу (1 – 2 хв) для фіксації форми виробу. Потім прес-форма розкривається і з неї виймається готовий виріб.

*Формування в прес-формах* — найбільш широко поширений спосіб виготовлення виробів з термореактивних пластмас, проводиться на гідравлічних пресах під тиском 10 – 25 МН/м<sup>2</sup> (100 – 250 кгс/см<sup>2</sup>). Пресматеріал надходить в нагріту до 130-200 °С пресформу. Під дією температури і тиску пресматеріала розм'якшується і заповнює всю порожнину прес-форми, яка через деякий час, достатній для затвердіння матеріалу, розкривається, і виріб виштовхується.

*Зварювання* як метод обробки пластмас застосовується для з'єднання деталей з термопластів контактним методом з присадним матеріалом або без нього. Термопласти, що мають обмежену пластичність при нагріванні (вініпласт, фторопласти і ін.), зварюються із застосуванням присадочного матеріалу у вигляді прутків або пасти.

*Склеювання* є одним із способів з'єднання пластмас між собою, а також з металом. Клейове з'єднання міцніше, надійніше і економічніше з'єднань на заклепках. Для склеювання металів і пластмас застосовують універсальні клеї БФ-2, БФ-4, карбінольний клей, а також клеї марок ПУ-2, ПК-5, ВК-32-200, ВК-32-ЕМ, Л-4, ВС-10Т.

Для склеювання шаруватих пластиків і пінопластів застосовують смоляні клеї ВІАМ-Б-3, КБ-3, ЦНИПС-2, К-17.

Для склеювання органічного скла і приклеювання до нього інших матеріалів застосовують клеї марок ВК-32-70, В-31-Ф9 і ін. Органічне скло також добре склеюється 3%-ним розчином поліметилметакрилата в дихлоретані, однак склеєна ним поверхня стає матовою, що є істотним недоліком.

Міцність клейового з'єднання залежить від правильного підбору клею, якості підготовки поверхонь, що склеюються, товщини клейової плівки, точності дотримання режимів склеювання, конструкції з'єднання.

### **Запитання для самоперевірки:**

1. Які інтервали температур застосовуються при відпуску?
2. З якою метою наносяться полімерні покриття?
3. У чому переваги порошкових «фарб» перед лакофарбовим покриттям?
4. Які недоліки покриттів, отриманих на основі порошкоподібних полімерів?
5. Яка технологія підготовки порошкових полімерів перед нанесенням покриттів?
6. Які фактори впливають на якість формованого покриття?
7. Які існують методи нанесення порошкових фарб?
8. У чому перевага модернізованих методів нанесення покриттів із застосуванням електричного поля?
9. Які термопласти застосовуються для нанесення покриттів?
10. Які термореактивні полімери застосовуються для порошкових «фарб»?



Практична робота № 4

Вивчення технології отримання полімерних пластичних матеріалів

1. По таблиці завдань знайти свій варіант.
2. Ознайомитися з найважливішими класами захисних полімерних покриттів і описати вплив складу покриття.
3. Описати технологію отримання полімерних пластичних матеріалів \*.

\*При наявності декількох способів отримання матеріалу, перерахувати всі способи, але описати один на вибір самостійно.

**Таблиця завдань**

Номер варіанту	Вид матеріалу
1	Поліметилметакрилат (ПММА)
2	Етилцелюлоза
3	Епоксидні смоли
4	Політетрафторетилен (ПТФЕ)
5	Фенолоформальдегідна смола
6	Полікапролактам (ПА-6)
7	Ненасичені полієфірні смоли
8	Поліетилен (ПЕ)
9	Співполімер стиролу з акрилонітрилом
10	Співполімер акрилонітрила зі стиролом і бутадієном (АБС)
11	Полівінілхлорид (ПВХ)
12	Меламіноформальдегідна смола
13	Ацетат целюлози
14	Нітрат целюлози
15	Поліакрилонітрил (ПАН)
16	Сечовиноформальдегідна смола
17	Фенолофурфуролова смола
18	Полівініліденфторид
19	Полігексаметиленадіпамід (ПА-6,6)
20	Поліетилентерефталат (ПЕТФ)
21	Поліетиленадіпат
22	Поліпропілен (ПП)
23	Полістирол (ПС)
24	Полівінілбутираль
25	Співполімер вінілхлорида з вінілацетатом

### 3 ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ. ПРОВІДНИКОВІ, НАПІВПРОВІДНИКОВІ ТА ІЗОЛЯЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

**Мета роботи** — здобути навички з визначення величин, що характеризують електропровідність провідникових, напівпровідникових і діелектричних матеріалів.

#### **Завдання:**

1. Вивчити теоретичні відомості з електропровідності провідникових, напівпровідникових і діелектричних матеріалів.
2. Навчитися застосовувати основні формули для визначення величин, які характеризують електропровідності електротехнічних матеріалів.
3. Навчитися користуватися довідковою літературою для визначення необхідних числових значень.
4. Здобути практичні навички з розрахунків опору, питомого електричного опору, провідності та різності потенціалів різних електротехнічних матеріалів.

#### **Короткі теоретичні відомості**

**Електропровідність** — це здатність речовини проводити електричний струм, обумовлена наявністю вільних зарядів в речовині.

Для чисельного визначення цієї здатності вводяться величини: **питомий електричний опір  $\rho$**  і **питома електрична провідність  $\gamma$** .

Ці величини є зворотними одна по відношенню до іншої:

$$\gamma = \frac{1}{\rho}. \quad (3.1)$$

Значення питомої електричної провідності речовини —  $\gamma$  [См/м] визначається як добуток сумарного заряду вільних носіїв в одиниці об'єму  $nq$  [Кл/м<sup>3</sup>] і рухливості цих зарядів —  $u$  [м<sup>2</sup>/с×В]:

$$\gamma = nq \times u, \quad (3.2)$$

де  $n$  — концентрація вільних зарядів, [1/м<sup>3</sup>];

$q$  — заряд носія, [Кл].

Цей вираз випливає із закону Ома в диференціальній формі:  $j = \gamma E$ ; поняття щільності струму  $j$ , що дорівнює добутку сумарного заряду носіїв в одиниці об'єму  $nq$  на їх швидкість  $v$  ( $j = nq \times v$ ) і визначення рухливості як середньої швидкості носіїв зарядів при одиничній напруженості електричного поля:  $u = v/E$ .

**Питомий електричний опір  $\rho$**  — це параметр речовини, чисельно рівний опору зразка довжиною 1 м з площею поперечного перерізу 1 м<sup>2</sup>, виміряного в плоско-паралельному полі.

Питомий електричний опір вимірюється в  $[Ом \frac{м^2}{м}]$  або в  $[Ом \times м]$ .  
 Питома електрична провідність вимірюється в  $[См/м]$ .

За значенням питомого електричного опору всі речовини поділяються на 3 класи:

Провідники .....  $\rho \approx 10^{-8} \dots 10^{-6} Ом \times м$ ;  
 Слабкопровідні матеріали (напівпровідники) ...  $\rho \approx 10^{-6} \dots 10^7 Ом \times м$ ;  
 Діелектрики (ізоляційні матеріали) .....  $\rho \approx 10^6 \dots 10^{20} Ом \times м$ .

У електропровідному матеріалі замість електростатичного поля електричних зарядів існує електричне поле струму, що протікає по матеріалу.

Для електропровідного матеріалу при плоско-паралельному полі, провідність конструкції, що має площу поперечного перерізу  $S$  і довжину  $d$ , буде дорівнювати:

$$G = \gamma \frac{S}{d}, \quad (3.3)$$

де  $\gamma$  – питома електропровідність матеріалу.

Оскільки провідність є величина, зворотна опору  $G = \frac{1}{R}$ , а питома електропровідність зворотна питомому електричному опору  $\gamma = \frac{1}{\rho}$ , то формула 3.3 ідентична добре відомій:

$$R = \rho \frac{d}{S},$$

де  $S$  – площа поперечного перерізу провідника;

$d$  – довжина провідника.

Для *радіально-циліндричного* поля вираз для провідності між двома коаксіальними циліндрами:

$$G = \gamma \frac{2\pi l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}, \quad (3.4)$$

де  $l$  – довжина провідника;

$r_1$  – радіус внутрішнього циліндра;

$r_2$  – радіус зовнішнього циліндра.

Із (3.4) нескладно отримати вираз для опору:

$$R = \rho \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi l}. \quad (3.5)$$

У *радіально-сферичному* полі потенціал кулі, з якого стікає струм в «нескінченність», буде виражатися як:

$$\varphi = \frac{I}{\gamma 4\pi r}, \quad (3.6)$$

де  $I$  – струм, який стікає з кульового електрода радіуса  $r$ .

Провідність між двома концентричними (які мають загальний центр) сферами радіусів  $r_1$  і  $r_2$ :

$$G = 4\pi\gamma \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1}. \quad (3.7)$$

Порівнюючи вирази для електростатичного поля в діелектрику та поля електричного струму в провіднику неважко встановити їх повну аналогію. В тому і іншому випадку при однакових полях однакові і частини виразів, що містять геометричні параметри. Якщо незалежно від виду поля ці частини виразів позначити буквою  $\Gamma$ , то матимемо два аналогічні вирази:

$$\begin{array}{ll} \text{Для електростатичного поля в} & \text{Для поля електричного струму} \\ \text{діелектрику} & \text{в провіднику} \\ C = \varepsilon_0 \varepsilon \Gamma & G = \gamma \Gamma \end{array} \quad (3.8)$$

Якщо матеріал конструкції між електродами має великий питомий опір і певне значення діелектричної проникності, то для такої конструкції з (3.8) справедливо впливає вираз:

$$CR = \varepsilon_0 \varepsilon \rho. \quad (3.9)$$

Ліва частина цього виразу є постійна часу розряду конденсатора з ємністю  $C$  через опір  $R$ . Права частина називається постійною часу релаксації:

$$\tau = \varepsilon_0 \varepsilon \rho.$$

**Час релаксації** відображає швидкість загасання збудження в матеріалі після зникнення електричного поля, який викликав цей збудження.

Для композиційних матеріалів, електропровідність і діелектрична проникність яких визначаються співвідношенням компонентів, які не реагують між собою, з різними значеннями зазначених величин.

Композиційним матеріалом називається матеріал, який складається з двох або більше компонентів, хімічно не зв'язаних між собою, але в підсумку змінюючих параметри матеріалу в цілому в порівнянні з параметрами кожного з компонентів.

Приклади: бетон, текстоліт, гетинакс, еком, бетел, віліт, гума, склопластик, деякі матеріали для електричних контактів, магнітодіелектрики і ін.

Формули для електростатичного поля в діелектрику та поля електричного струму в провіднику є повністю ідентичними. Тому електропровідність і діелектричну проникність можна вважати аналогічними величинами і присвоїти їм єдину назву — **узагальнена провідність**. Будемо позначати це поняття загальним символом  $\sigma$ , розуміючи в кожному конкретному випадку під ним або діелектричну проникність або електропровідність.

Якщо змішувати дві речовини з різними значеннями  $\sigma$ , то можливе утворення двох структур: матрична система і статистична суміш.

У **матричній системі** один з матеріалів утворює безперервну матрицю, в яку вкраплені включення іншого матеріалу. Значення узагальненої провідності для матричної суміші визначається виразом:

$$\sigma_{\text{екв}} = \sigma_0 \left( 1 + \frac{v_1}{\frac{1-v_1}{3} + \frac{\sigma_0}{\sigma_1 - \sigma_0}} \right), \quad (3.10)$$

де  $\sigma_0$  і  $\sigma_1$  – узагальнені провідності матричної фази і наповнювача;  
 $v_1$  – об’ємна частка наповнювача (в частках одиниці).

У **статистичної суміші** обидва матеріали рівноправні, і значення узагальненої провідності розраховується за виразом:

$$\sigma_{\text{екв}} = A + \sqrt{A^2 + \frac{\sigma_1 \sigma_2}{2}}, \quad (3.11)$$

де  $A = \frac{(3v_1-1)\cdot\sigma_1+(3v_2-1)\cdot\sigma_2}{4}$  (тут  $v_1, v_2$  — об’ємні частки компонентів суміші в частках одиниці).

### Приклад

Опишіть властивості електроізоляційних кабельних гум. Перевірте, чи спрацює пристрій захисного відключення (УЗО) при наступних умовах: шахтний одножильний кабель діаметром 12 мм довжиною 500 м, перетином жили 35 мм<sup>2</sup>, з ізоляцією з гуми типу РТІ-1 потрапив у воду. Напруга на жилі – 380 В. УЗО спрацює, якщо витік через ізоляцію перевищить 10 мА.

### Розв’язання:

Гума є вулканізованою багатокомпонентною сумішшю на основі каучуків. Гумова суміш виготовляється шляхом введення в каучук мінеральних або вуглецевих порошкоподібних наповнювачів (крейда, тальк, каолін, техвуглець), вулканізуючих агентів та ін.

Каучуки бувають натуральні і синтетичні. Натуральний каучук є природним продуктом коагуляції частинок, що міститься в соку, який витягають зі стовбурів каучукових дерев, що ростуть в країнах з тропічним кліматом. Синтетичні каучуки є продуктом полімеризації (вулканізації) сумішей різноманітних хімічних речовин: ізопрену, бутадієну, стиролу, ізобутилену, етилену, пропілену, хлоропрену і ін.

Гуми типу РТІ відносяться до кабельних ізоляційних гум, тобто застосовуються при виготовленні кабелів поряд з ізоляційно-захисними гумами, гумами для захисних оболонки і електропровідними гумами. Для ізоляції, що допускає тривале нагрівання струмопровідної жили до 65 °С, застосовуються гуми на основі каучуків загального призначення типів РТІ-0, РТІ-1, РНІ, а також ізоляційно-захисні гуми типів РТІШ і РТІШМ. Найбільш широко для ізолювання кабелів, проводів і шнурів застосовують гуми типу РТІ-1. Вони відповідають експлуатаційним вимогам всіх кабельних виробів на змінну напругу до 660 В і постійну до 1 000 В.

Міцність при розтягуванні гуми РТІ-1 становить 5,88 МПа, а відносне подовження при розриві не менше 350 %.

Електричні характеристики гум типу РТІ-1 в залежності від часу зволоження показані в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Електричні характеристики гум типу РТІ-1 в залежності від часу зволоження

Час зволоження, діб	Зволоження при 20 °С				Зволоження при 70 °С			
	$\rho$ , Ом·м	$\text{tg}\delta$	$\epsilon$	$E_{\text{пр}}$ , МВ/м	$\rho$ , Ом·м	$\text{tg}\delta$	$\epsilon$	$E_{\text{пр}}$ , МВ/м
0	$2,4 \cdot 10^{13}$	0,021	3,4	41,9	$2,4 \cdot 10^{13}$	0,021	3,6	41,9
1	$8,0 \cdot 10^{12}$	0,022	3,8	37,5	$3,9 \cdot 10^{12}$	0,013	4,2	13,9
4	$1,3 \cdot 10^{12}$	0,026	3,9	17,9	$3,9 \cdot 10^{12}$	0,012	4,3	9,8
7	$1,2 \cdot 10^{12}$	0,026	3,8	15,1	$3,9 \cdot 10^{12}$	0,012	4,6	8,0
14	$1,1 \cdot 10^{12}$	0,027	3,8	14,1	$3,6 \cdot 10^{12}$	0,015	4,6	6,0

У таблиці крім питомого електричного опору наводяться також значення тангенса кута діелектричних втрат ( $\text{tg}\delta$ ), діелектричної проникності ( $\epsilon$ ) і електричної міцності ( $E_{\text{пр}}$ ).

Розрахуємо питомий електричний опір електричної ізоляції з гуми РТІ-1, при якому може спрацювати УЗО. Для цього спочатку визначимо радіус струмопровідної жили через площу її перетину  $S$ :

$$r_1 = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = \sqrt{\frac{35}{3,14}} \approx 3,34 \text{ (мм)}.$$

Радіус зовнішньої еквіпотенційної поверхні коаксіальної системи можна прийняти рівним 6 мм, оскільки кабель знаходиться у воді, а його діаметр дорівнює 12 мм.

Опір визначимо, виходячи із вихідних даних:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{380}{10 \cdot 10^{-3}} = 38000 \text{ (Ом)}.$$

Розраховуємо питомий електричний опір з (3.5):

$$\rho_{\text{гуми}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 500 \cdot 38000}{\ln \frac{6}{3,34}} \approx 2,04 \cdot 10^8 \text{ (Ом} \times \text{м)}.$$

Таким чином, УЗО може спрацювати, якщо питомий опір в результаті зволоження знизиться до  $2 \cdot 10^8$  Ом×м.

Порівнюючи отримане значення зі значеннями в табл. 3.1, бачимо, що питомий опір гуми РТІ-1 навіть після 14-и днів зволоження при будь-якій температурі має значення на 4 порядки вище, ніж отриманий в нашому розрахунку. Таким чином, при попаданні гумового кабелю у воду спрацювання УЗО не відбудеться. Тобто умови електробезпеки при експлуатації гумового кабелю у воді дотримуються. Можливо, відключення УЗО може статися, якщо в ізоляції будуть додаткові пошкодження, наприклад, тріщини від старіння.

### Задачі для самостійного розв'язання

**Задача 1.** Опишіть властивості міді і області її застосування. Використовуючи ці властивості, вирішіть задачу: в точку на поверхні розплавленої міді вводиться струм силою 10 кА. Якщо вимірювати різницю

потенціалів між точками, радіально віддаленими від місця введення струму на відстані 10 і 20 см, що покаже прилад?

**Задача 2.** Опишіть алюміній (фізичні, електричні властивості, область застосування). Вирішіть задачу: між двома коаксіальними кільцями наливається розплавлений алюміній. Як потрібно змінити товщину шару застиглої алюмінію, щоб опір між кільцями не змінився?

**Задача 3.** Опишіть мідь і алюміній як електропровідні матеріали і вкажіть, як впливають добавки на електричні характеристики матеріалів. Покажіть це на наступному прикладі: один провід зроблений з алюмінію з додаванням 0,25% міді. Інший – з чистого алюмінію. У скільки разів довжина одного проводу більша за іншу, якщо їх опір і перетин однакові?

**Задача 4.** Опишіть полікристалічний графіт – властивості (фізичні, електричні), область застосування. Виконайте розрахунок: до кінців двох коаксіальних циліндрів з полікристалічного графіту з зовнішніми діаметрами 5 см і 10 см, товщиною стінки 1 см і довжиною 1 м докладено напругу 1 В. Визначити струми в тому і в іншому циліндрі.

**Задача 5.** Опишіть фізичні і електричні властивості контактних композиційних матеріалів і область їх застосування. Розрахуйте опір контакту в наступному прикладі: при замиканні контактів, виконаних з контактної композиції КМК-Б25, вони торкнулися один одного лише площадками діаметром 0,1 мм.

**Задача 6.** Опишіть поліетилен. Знайдіть мінімальне значення опору ізоляції з поліетилену (ПЕВТ) у одножильного кабелю з діаметром струмоведучої жили 1 мм і діаметром екрану 10 мм при довжині кабелю 1 км.

**Задача 7.** Опишіть фізичні і електричні властивості, область застосування ніхромового проводу із сплаву Х20Н80. Визначте масу цього проводу діаметром 0,6 мм, необхідну для створення резистора з опором 2,5 кОм, що працює при оптимальній для цієї марки температурі.

**Задача 8.** Розробляється новий електротехнічний матеріал, шляхом змішування подрібненої слюди (мусковіт) з поліуретаном. Опишіть фізичні, електричні властивості і область застосування зазначених матеріалів. Передбачте значення питомого опору нового матеріалу при вмісті в ньому слюди (з мінімальним питомим опором) 20% і 80% за обсягом.

**Задача 9.** Опишіть високонагрівостійке склоемалеве покриття для проводу марки ПЕЖБ та оцініть опір ізоляції цього проводу в нормальному стані і після витримки в 100% вологості протягом 250 годин. Діаметр проводу – 0,4 мм, товщина ізоляції – 20 мкм, а довжина проводу – 100 м.

**Задача 10.** Опишіть фізичні і електричні властивості, область застосування ніхрому і сталі. Користуючись знайденими параметрами, оцініть як відрізняються довжини проводів з ніхрому марки Х15Н60 і сталі марки НЖ, якщо у цих проводів однаковий перетин і опір.

## 4 МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ

**Мета роботи** — здобути навички з визначення величин магнітних втрат.

### **Завдання:**

1. Вивчити теоретичні відомості з основних магнітних властивостей матеріалів матеріалів.
2. Здобути навички з розшифровки маркування електротехнічних сталей.
3. Навчитися застосовувати основні формули для визначення величин, які характеризують втрати на перемагнічування та вихрові струми.
4. Навчитися користуватися довідковою літературою для визначення необхідних числових значень.
5. Здобути практичні навички з розрахунків магнітних втрат у матеріалах, а також будувати криві намагнічування електротехнічних сталей.

### **Короткі теоретичні відомості**

До **магнітних матеріалів** відносяться матеріали з упорядкованою магнітною структурою і великою магнітною проникністю: феромагнетики і феримагнетики.

Основною особливістю магнітних матеріалів є висока магнітна проникність  $\mu$  і залежність магнітної проникності від напруженості магнітного поля.

**Магнітна проникність  $\mu$**  — це фізична величина, що характеризує зміну магнітної індукції при впливі магнітного поля.

Для ізотропних середовищ магнітна проникність дорівнює відношенню індукції в середовищі  $B$  до напруженості зовнішнього магнітного поля  $H$  і до магнітної постійної  $\mu_0$ :

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}. \quad (4.1)$$

Магнітна проникність — величина безрозмірна.

При малій напруженості зовнішнього магнітного поля (або його відсутності), коли магнітні моменти доменів магнітного матеріалу утворюють замкнуті магнітні ланцюги, магнітна проникність мінімальна і носить назву **початкова магнітна проникність** —  $\mu_{поч}$ .

Домени — це області хімічно однорідного середовища, що відрізняються електричними, магнітними або пружними властивостями, або впорядкованістю в розташуванні частинок. Магнітні домени — області мимовільної намагніченості, у відсутності зовнішнього магнітного поля орієнтовані таким чином, що результуюча намагніченість зразка в цілому дорівнює нулю.



Збільшення напруженості магнітного поля призводить до необоротного зсуву доменних кордонів, орієнтації векторів намагніченості доменів по полю і збільшення магнітної проникності аж до **максимальної магнітної проникності** –  $\mu_{max}$ .

При подальшому збільшенні напруженості зовнішнього магнітного поля відбувається повна орієнтація магнітних моментів доменів по полю і матеріал переходить в стан технічного насичення. Магнітна проникність зменшується, наближаючись до одиниці.

В силу залежності магнітної проникності від напруженості магнітного поля залежність індукції в матеріалі від напруженості зовнішнього магнітного поля нелінійна. Ця залежність називається **початковою кривою намагнічування** і показана на рис. 4.1. На рис. 4.1 також показана залежність магнітної проникності від напруженості зовнішнього магнітного поля, побудована для того ж матеріалу.

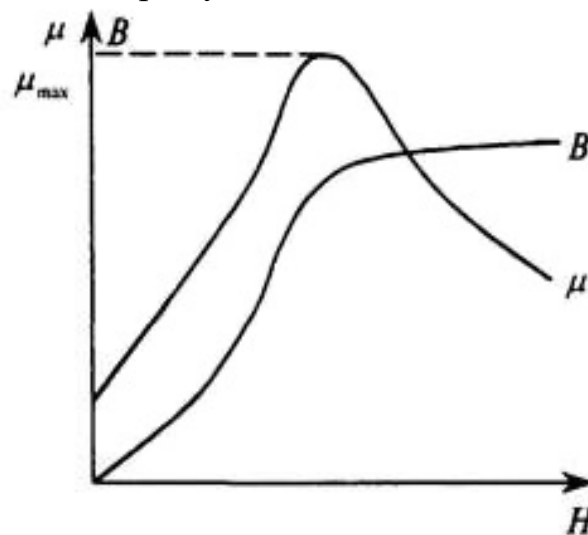


Рисунок 4.1 – Залежність індукції в матеріалі та магнітної проникності від напруженості зовнішнього магнітного поля

Комплекс магнітних властивостей магнітного матеріалу описується кривими намагнічування-розмагнічування (залежністю індукції в матеріалі від напруженості змінного магнітного поля) — петлями гистерезиса (hysteresis — відставання, запізнювання). Найбільш інформативною є гранична петля гистерезису, коли індукція в матеріалі досягає максимально можливого значення для зразка (матеріал повністю намагнічений). Гранична петля гистерезиса визначає наступні параметри магнітного матеріалу:

- початкова магнітна проникність,  $\mu_{поч}$  (при напруженості магнітного поля на початковій кривій намагнічування близькою до нуля);
- максимальна магнітна проникність,  $\mu_{max}$  (в точці кривої намагнічування з максимальним значенням похідної);
- індукція насичення,  $B_{нас}$  (індукція повного намагнічування зразка. Індукція технічного насичення – це значення індукції магнітного матеріалу, що визначається екстраполяцією з області напруженості магнітних полів,

відповідних намагніченості технічного насичення, до нульового значення напруженості поля);

– залишкова індукція,  $B_{зал}$  (індукція, що зберігається в магнітному матеріалі після намагнічування його до намагніченості технічного насичення і зменшення напруженості магнітного поля в ньому до нуля);

– коерцитивна сила,  $H_c$  (величина, що дорівнює напруженості магнітного поля, необхідного для зміни магнітної індукції від залишкової індукції до нуля. За значенням коерцитивної сили розрізняють магнітом'які  $H_c \leq 800$  А/м і магнітотверді  $H_c \geq 4\,000$  А/м матеріали);

– магнітні втрати на гістерезис – втрати енергії на перемагнічування, пропорційні площі, охопленої петлею гістерезиса.

Петля гістерезису представлена на рис. 4.2.

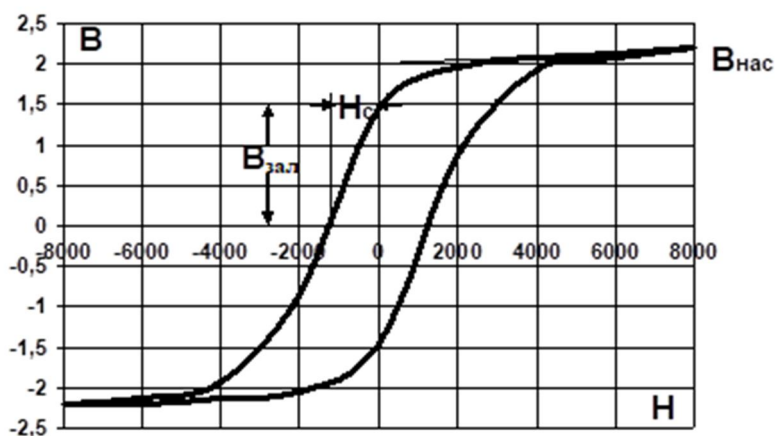


Рисунок 4.2 – Гранична петля гістерезису

Магнітні втрати бувають двох видів:

*Втрати на перемагнічування* (на гістерезис) — втрати енергії, що нагрівають магнітний матеріал і пов'язані з перебудовою доменів у змінному магнітному полі. Питома потужність втрат, які витрачаються на гістерезис, пропорційна максимальному значенню індукції  $B_{max}$  (виникає в матеріалі при перемагнічуванні) в ступені 1,6 ... 2,0 і частоті,  $f$ :

$$P_{\text{гист}} \sim B(1,6 \dots 2)f. \quad (4.2)$$

*Втрати на вихрові струми* — втрати енергії, що нагрівають магнітний матеріал і обумовлені індуктованими в ньому змінним магнітним полем вихровими струмами, більшими при більшій електропровідності матеріалу. Питома потужність втрат, які витрачаються на вихрові струми, пропорційна квадрату максимального значення індукції  $B_{max}$  (виникає в матеріалі при перемагнічуванні) і квадрату частоти,  $f$ :

$$P_{\text{вихр}} \sim B_{max}^2 f^2. \quad (4.3)$$

### Приклад

Опишіть електротехнічні сталі з нормованими магнітними властивостями в змінних полях, зокрема, сталі 1511 і 1521. Оцініть втрати в сталі 1521 при частоті 50 Гц і напруженості зовнішнього магнітного поля 2500 А/м і порівняйте ці втрати з втратами в сталі 1511 при тих же умовах.

### Розв'язання:

Магнітні втрати є нормованими характеристиками електротехнічної сталі, і надаються в довідниках. Оскільки довідкові дані наводяться за певних умов (наприклад, при певній напруженості магнітного поля або певній індукції в матеріалі), то можна припустити, що дана в завданні напруженість поля (і відповідна їй індукція) не відповідають нормованим умовам. Для оцінки втрат необхідно привести умови завдання до нормованих. Для цього скористаємося виразами для втрат на перемагнічування:  $P_{\text{гист}} = \alpha B(1,6 \dots 2)f$ , і на вихрові струми:  $P_{\text{вихр}} = \beta B_{\text{max}}^2 f^2$ .

У цих виразах  $B$  і  $f$  індукція і частота, відповідні нормованим умовам визначення втрат. Якщо їх знайти в довідкових даних, то можна визначити коефіцієнти  $\alpha$  і  $\beta$ , а потім привести втрати до умов, заданих в завданні. Можливо, буде потрібно перерахунок заданої напруженості поля в індукцію за виразом (4.1), де  $\mu$  – магнітна проникність розглянутих сталей при заданій напруженості магнітного поля  $H$ .  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Гн/м.

Сталь, як відомо, це сплав заліза з вуглецем при вмісті вуглецю менше 2,14 %.

Магнітні втрати — перетворення енергії електромагнітного поля в тепло за рахунок перемагнічування і вихрових струмів. Вихрові струми — струми, що виникають в електропровідному магнітному матеріалі за законом електромагнітної індукції (при змінному магнітному потоці).

Магнітна індукція ( $B$ ) — векторна величина, що дорівнює щільності магнітного потоку в заданій точці:  $B = d\Phi/dS$ .

Магнітна проникність ( $\mu$ ) — це фізична величина, що характеризує зміну магнітної індукції при впливі магнітного поля. Для ізотропних середовищ магнітна проникність дорівнює відношенню індукції в середовищі  $B$  до напруженості зовнішнього магнітного поля  $H$  і до магнітної постійної  $\mu_0$  (4.1).

Електротехнічні сталі з нормованими властивостями в змінних полях відносяться до магнітом'яких металевих матеріалів. Електротехнічні сталі зазвичай легується кремнієм. Легування кремнієм викликає зменшення коерцитивної сили, збільшення питомого опору і зниження втрат на вихрові струми, деяке зниження індукції насичення, велику магнітну проникність у слабких і середніх полях внаслідок магнітної м'якості матеріалу.

У позначенні марок цифри означають:

*Перша* — клас за структурним станом і виду прокатки:

1 – гарячекатана, ізотропна;

2 – холоднокатана ізотропна;

- 3 – холоднокатана анізотропна з ребровою текстурою;  
 5 – холоднокатана анізотропна з плоскою кубічною текстурою.

*Друга — вміст кремнію:*

- 0 – до 0,4 % (нелегована);  
 1 – (0,4 ... 0,8) %;  
 2 – (0,8 ... 1,8) %;  
 3 – (1,8 ... 2,8) %;  
 4 – (2,8 ... 3,8) %; питомі втрати нормуються за магнітної індукції  $B = 1,5$  Тл і частоті  $f = 50$  Гц;  
 5 – (3,8 ... 4,8) %.

*Третя – група за основною нормованою характеристикою:*

- 0 – питомі втрати при магнітній індукції  $B = 1,7$  Тл і частоті  $f = 50$  Гц;  
 1 – питомі втрати при магнітній індукції  $B = 1,5$  Тл і частоті  $f = 50$  Гц;  
 2 – питомі втрати при магнітній індукції  $B = 1,0$  Тл і частоті  $f = 400$  Гц;  
 4 – питомі втрати при магнітній індукції  $B = 0,5$  Тл і частоті  $f = 3\ 000$  Гц;  
 6 – магнітна індукція в слабких полях при напруженості поля  $H = 0,4$  А/м;  
 7 – магнітна індукція в середніх полях при напруженості поля  $H = 10$  А/м.

*Четверта – порядковий номер типу сталі.*

Таким чином, задані електротехнічні сталі характеризуються наступним чином:

1511 – гарячекатана ізотропна сталь, з вмістом кремнію – (3,8 ... 4,8) %, питомі втрати нормуються при магнітній індукції  $B = 1,5$  Тл і частоті  $f = 50$  Гц, тип сталі – 1.

1521 – ця сталь відрізняється від попередньої тільки тим, що питомі втрати нормуються при магнітній індукції  $B = 1,0$  Тл і частоті  $f = 400$  Гц.

Ці сталі поставляються у вигляді листів товщиною 0,1 ... 1,0 мм, шириною 500 ... 1 000 мм і довжиною 600 ... 2 000 мм.

Фізичні та механічні властивості зазначених марок сталей представлені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Фізичні та механічні властивості марок сталей 1511 і 1521

Найменування властивості	Значення	Визначення
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Щільність	7,55 Мг/м <sup>3</sup>	Маса одиниці об'єму.
Питомий опір при 20 °С	0,6·10 <sup>-6</sup> Ом×м	Опір 1 м <sup>3</sup> матеріалу, вимірний у плоско-паралельному полі.
Температурний коефіцієнт опору	0,7·10 <sup>-3</sup> К <sup>-1</sup>	Відносна зміна питомого опору при збільшенні температури на 1 К.
Коефіцієнт теплопровідності	16 Вт/м×К	Питомий тепловий потік, направлений перпендикулярно поверхні при градієнті температури 1 К.

Найменування властивості	Значення	Визначення
1	2	3
Умовна межа текучості вздовж/поперек	420/490 МПа	Нормальне напруження, при розвантаженні від якого у зразку вперше виявляється залишкова пластична деформація, що складає 0,2 %).
Межа міцності (при растягуванні) вздовж/поперек	490/600 МПа	Граничне нормальне напруження, після якого відносно подовження зразка проходить при зниженні нормального напруження; максимальне напруження, яке витримується зразком.
Відносне подовження вздовж/поперек	1,5/2 %	Відношення абсолютного залишкового подовження зразка після розриву до початкової розрахункової довжини.
Модуль пружності вздовж/поперек	158/197 ГПа	Коефіцієнт пропорційності між нормальним напруженням і відносним подовженням. Визначається в пружній області (закон Гука).

Електротехнічні крем'янисті сталі застосовуються для виготовлення двигунів і генераторів, дроселів і трансформаторів, електромагнітних механізмів і реле, що працюють як на постійному, так і на змінному струмі різної частоти.

Нормовані характеристики сталей розглянутих марок наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Нормовані характеристики сталей марок 1511 і 1521  
(обрані сталі з однаковою товщиною листа – 0,35 мм)

Марка	Питомі втрати Вт/кг при індукції, Тл, що дорівнює			Магнітна індукція, Тл при напруженості магнітного поля, А/м, що дорівнює					
	0,75	1	1,5	500	1 000	2 500	5 000	10 000	30 000
1511		1,35	3,0		1,30	1,46	1,57	1,70	1,90
1521	10,75	19,5		1,21	1,30	1,44			

Відповідно з маркою сталі магнітні втрати для сталі 1521 нормуються при магнітній індукції  $B = 1,0$  Тл і частоті  $f = 400$  Гц і складають 19,5 Вт/кг (табл. 4.2). При напруженості зовнішнього магнітного поля 2 500 А/м індукція в сталі 1521 становить 1,44 Тл (див. табл. 4.2). Отже, нормовані втрати необхідно привести до умов завдання. Оскільки сталь магнітом'яка, то наближено можна вважати, що основна частка втрат – це втрати на вихрові струми. Тому скористаємося формулою втрат на вихрові струми.

$$P_{\text{вихр}} = \beta B_{\text{max}}^2 f^2.$$

Шукані втрати  $P_{\text{вихр}} = \beta \cdot 1,44^2 \cdot 50^2$ .

Для сталі 1511 втрати нормуються при індукції 1,5 Тл. Оскільки у цій сталі при напруженості поля 2 500 А індукція становить 1,44 Тл, то нормовані втрати збільшаться в  $1,52/1,442=1,085$  рази, тобто складуть  $3\text{Вт/кг} \times 1,085=3,255\text{ Вт/кг}$ .

Якщо сталь 1521, призначена для роботи при частоті 400 Гц застосовувати в умовах, аналогічних застосуванню сталі 1511, тобто при частоті 50 Гц, то магнітні втрати в сталі 1521 будуть менше, ніж в сталі 1511.

### Задачі для самостійного розв'язання

**Задача 1.** Опишіть електротехнічні нелеговані сталі. Побудуйте криву намагнічування електротехнічної нелегрованої сталі (ГОСТ 11036-75) марки 10864 в постійному полі.

**Задача 2.** Опишіть електротехнічні гарячекатані сталі. Побудуйте залежність відносної магнітної проникності від напруженості магнітного поля для електротехнічної сталі (ГОСТ 21427.3-75) марки 1571 для листа товщиною 0,35 мм.

**Задача 3.** Опишіть електротехнічні холоднокатані сталі. Визначте питомі втрати в магнітопроводі з листів холоднокатаної сталі типу 2 (ГОСТ 21427.2-83) зі вмістом кремнію до 0,4%, товщиною листа 0,65 мм, при напруженості поля 1000 А/м, частоті 50 Гц, з огляду на коефіцієнт заповнення, рівний 0,93.

**Задача 4.** Опишіть електротехнічні гарячекатані сталі. Побудуйте криву залежності питомих втрат в гарячекатаній сталі (ГОСТ 21427.3-75) марки 1211 при товщині листа 0,5 мм від напруженості магнітного поля в діапазоні 2500...30000 А/м при частоті 50 Гц.

**Задача 5.** Опишіть електротехнічні гарячекатані сталі. У магнітопроводі об'ємом 0,51 м<sup>3</sup>, виконаному з листів 0,35 мм гарячекатаної сталі марки 1411 (ГОСТ 21427.3-75) з коефіцієнтом заповнення 0,98, загальні втрати в сталі складають 13 кВт. Визначте напруженість магнітного поля.

**Задача 6.** Опишіть магнітом'які сплави з прямокутною петлею гістерезису. Визначте, у скільки разів магнітна індукція в осерді зі стрічок товщиною 0,01 мм сплаву 79 НМ (ГОСТ 10160-75) при напруженості магнітного поля 7 А/м буде менше індукції насичення. Магнітну проникність прийняти рівною початкової.

**Задача 7.** Опишіть магнітом'які сплави з підвищеним електричним опором. Визначте, у скільки разів напруженість магнітного поля при індукції, близької до індукції насичення, більше коерцитивної сили для стрічки товщиною 0,50 мм зі сплаву 50НХС класу II вважаючи, що відносна магнітна проникність досягла значень початкової.

**Задача 8.** Опишіть магнітом'які сплави з низькою залишковою індукцією. У сплаву марки 47 НК зняли криву намагнічування при температурі 20 °С в інтервалі напруженостей магнітного поля 100...1000 А/м.

Потім, не послаблюючи напруженості, охолодили зразок до  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  і зняли зворотний хід кривої. Відтворіть на графіку результати досліду.

**Задача 9.** Опишіть марганцево-цинкові ферити. Побудуйте криву намагнічування феритового стрижня марки 3000НМ при частоті 0,1 МГц в діапазоні напруженості поля 0 ... 32 А/м.

**Задача 10.** Опишіть нікель-цинкові ферити. Вважаючи температурний коефіцієнт магнітної проникності незмінним в діапазоні напруженостей магнітного поля 0 ... 10 А/м, побудуйте залежність магнітної індукції у фериті 2000НН від температури при напруженості поля 8 А м і в діапазоні температур 0 ... 70  $^{\circ}\text{C}$ . Що станеться при нагріванні зразка до 100  $^{\circ}\text{C}$ ?

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Готтштайн Г. Физико-химические основы материаловедения / Г. Готтштайн ; пер. с англ. К. Н. Золотовой, Д. О. Чаркина; под ред. В. П. Зломанова. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 400 с.: ил. – (Лучший зарубежный учебник).
2. Иваней А. А. Практикум по дисциплине «Материаловедение и технологии конструкционных материалов» / А. А. Иваней. – Мурманск, 2010. – 214с.
3. Шубина Н. Б. материаловедение / Н. Б. Шубина, О. В. Белянкина. – М.: МГГУ, 2012. – 162 с.
4. Дриц М. Е. Технология конструкционных материалов и материаловедение : учеб. для вузов / М. Е. Дриц, М. Н. Москалев. – М. : Высш. шк., 1990. – 447 с.
5. Кларк Эшли Р. Микроскопические методы исследования материалов / Эшли Р. Кларк, Колин Н. Эберхарт. – М. : Техносфера, 2007. – 376 с.
6. Скуріхін В. І. Конструкційні матеріали : конспект лекцій (для студентів 1 курсу усіх форм навчання спец. 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка). / В. І. Скуріхін, О. Ф. Бабічева. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 61 с.
7. Лахтин Ю. М. материаловедение : учеб. для высших техн. учеб. заведений / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1990. – 528 с.
8. Марочник сталей и сплавов / под ред. В. Г. Сорокина. –М. :Машиностроение, 1989. – 640 с.
9. Общетеchnический справочник / под ред. Е. А. Скороходова. – 4-е изд., испр. М. : Машиностроение, 1990. – 496 с.
10. Рыбьев И. А. Основы строительного материаловедения / И. А. Рыбьев. – М. : Астрель: АСТ: Хранитель, 2006. – 279 с.
11. материаловедение и технология металлов / Г. П. Фетисов, М. Г. Карпман, В. М. Матюнин и др. – М. : Высш. шк., 2000. – 638 с.
12. Справочник по электротехническим материалам : в 3 т. / под ред. Ю. В. Корицкого и др. – 3-е изд., перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – Т.1 – 368 с.
13. Справочник по электротехническим материалам: в 3 т. / под редакцией Ю. В. Корицкого и др. – 3-е изд., перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – Т.2 – 464 с.
14. Справочник по электротехническим материалам : в 3 т. / под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – 3-е изд., перераб. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. – Т.3 – 728 с.
15. материаловедение. Технология конструкционных материалов: Сборник практических заданий / С. М. Коробейников, С. В. Нестеров, Ю. В. Целебровский, Н. А. Черненко : под ред. Ю. В. Целебровского. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2008. – 102 с.



*Виробничо-практичне видання*

Методичні рекомендації  
до організації та проведення практичних занять  
із навчальної дисципліни

**«КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ»**

*(для студентів усіх форм навчання першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма «Електромеханіка»)*

Укладачі: **СКУРІХІН** Владислав Ігорович,  
**ГАРБУЗ** Нонна Володимирівна

Відповідальний за випуск *Ю. П. Бархаєв*  
*За авторською редакцією*  
Комп'ютерне верстання *Н. В. Гарбуз*

План 2020, поз. 357 М

---

Підп. до друку 18.09.2019. Формат 60 × 84/16.  
Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 4,2  
Тираж 50 пр. Зам. № .

Видавець і виготовлювач:  
Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.  
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 5328 від 11.04.2017.