

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ
з дисципліни
“МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАТЕРІАЛИ
ЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ”
(частина 2)

для студентів спеціальності
172 «Телекомунікації та радіотехніка»
(спеціалізації «Радіoeлектронні апарати та засоби»
та «Інтелектуальні технології мікросистемної
радіoeлектронної техніки»)
усіх форм навчання

2017

Конспект лекцій з дисципліни "Матеріалознавство та матеріали електронних апаратів" (частина 2) для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» (спеціалізації «Радіоелектронні апарати та засоби» та «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки») усіх форм навчання / Уклад.: Фурманова Н.І., Фарафонов О.Ю. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. – 46 с.

Укладачі: Фурманова Наталія Іванівна, канд. техн. наук,
доцент кафедри ІТЕЗ;
Фарафонов Олексій Юрійович, канд. техн. наук,
доцент, доцент кафедри ІТЕЗ.

Рецензент: Миронова Наталія Олексіївна, канд. техн. наук,
доцент кафедри ПЗ

Відповідальний за випуск: Шило Галина Миколаївна, канд.
техн. наук, доцент, в.о. зав. каф. ІТЕЗ

Розглянуто
на засіданні кафедри ІТЕЗ
протокол № 6 від 23.01.17 р.

Затверджено
на засіданні НМК ФРЕТ
протокол № 5 від 26.01.17 р.

ЗМІСТ

7 ОСНОВИ ТЕОРІЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ.....	66
7.1 Перетворення та основні структури при нагріванні та охолодженні сталі.....	67
7.2 Вплив нагріву на структуру і властивості деформованого металу.....	71
8 ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ.....	74
8.1 Класифікація видів термічної обробки	74
8.2 Відпал	75
8.3 Гартування	77
8.4 Відпуск.....	81
8.5 Термічна обробка чавуну	83
9 ХІМІКО-ТЕРМІЧНА ОБРОБКА СТАЛІ.....	87
9.1 Цементация	88
9.2 Азотування.....	89
9.3 Ціанування та ніпроцементация	90
9.4 Дифузійна металізація.....	91
9.5 Хіміко-термічна обробка чавуну	92
10 НЕМЕТАЛЕВІ МАТЕРІАЛИ.....	94
10.1 Полімери	94
10.2 Термопластичні пластмаси.....	98
10.3 Термореактивні пластмаси.....	100
10.4 Гумові матеріали	103
ЛІТЕРАТУРА.....	108

7 ОСНОВИ ТЕОРІЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ

У сучасному машинобудуванні **термічна обробка** є найбільш поширеним способом зміни структури та властивостей металів і сплавів. Це технологічний процес теплової обробки металів і сплавів з метою зміни їхньої структури та властивостей шляхом нагрівання і охолодження. Результатом термічної обробки є зміцнення або знеміцнення сплаву (сталі). Проте термічна обробка ефективно впливає на властивості лише тих сплавів, які мають не менше двох фаз, здатних до перетворення при нагріванні і охолодженні. Так, залізовуглецеві сплави (сталі) мають дві поліморфні модифікації: на основі α -заліза (ОЦК-гратка) і γ -заліза (ГЦК-гратка), які зумовлюють можливість проведення термічної обробки сталей. Наукові основи термічної обробки було закладено Д.К.Черновим у 1868р. відкриттям критичних температур (точок A_1 і A_3), за яких відбуваються фазові перетворення при нагріванні і охолодженні сталі, та побудовою на їхній основі діаграми стану системи залізо-вуглець.

Будь-яка операція термічної обробки – це нагрівання металу до певної температури (t) з потрібною швидкістю нагрівання (V_n), витримування за цієї температури протягом певного часу (τ) й охолодження із заданою швидкістю (V_{ox}). Залежно від температури нагрівання розрізняють обробку з нагрівом до температур вище і нижче температури фазових перетворень (T_n). Температура нагрівання та швидкість охолодження визначають вид термічної обробки. Так (рис. 7.1), нагрівання вище температури фазових перетворень (T_2) і подальше повільне охолодження призводять до фізико-хімічної та структурної рівноваги сталі.



Рисунок 7.1 – Схематичне зображення різних видів термічної обробки

Такі операції називають **відпалюванням**. Швидке ж охолодження заважає утворенню рівноважної структури, й таку операцію називають **гартуванням**. Нагрівання до температури нижче за температуру фазових перетворень (T_1) сприяє наближенню до стану рівноваги. Вплив швидкості охолодження при цьому незначний. Такі операції термічної обробки називають **відпуском**.

7.1 Перетворення та основні структури при нагріванні та охолодженні сталі

Фазові перетворення в сталі відбуваються внаслідок зміни умов (наприклад, температури), коли один стан системи стає менш стабільним за інший. Розрізняють такі основні структурні стани під час термічної обробки сталі:

- аустеніт (А) – твердий розчин вуглецю (С) в γ -залізі Fe_γ ;
- мартенсит (М) – перенасичений твердий розчин вуглецю в α -залізі Fe_α (С);
- перліт (П) – евтектоїдна суміш фериту (Ф) і цементиту $\text{Fe}_\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$.

7.1.1 Перетворення перліту в аустеніт ($\text{П} \rightarrow \text{А}$)

Відбувається за нагрівання сталі, згідно (рис. 7.2) лівої частини діаграми $\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$, вище за температуру критичної точки A_1 (727°C , лінія PSK). За нагрівання вище 727°C відбуваються процеси дифузії атомів вуглецю для досягнення концентрації 0,8%. Швидкість перетворення зростає при підвищенні температури.

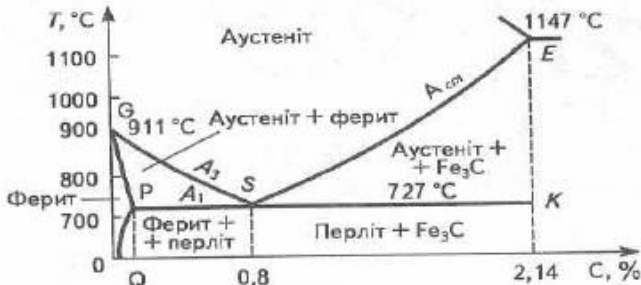


Рисунок 7.2 – Нижня ліва частина (сталева ділянка) діаграми стану $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$

При нагріванні евтектоїдної сталі (0,8% С) вище за точку A_1 (780...800 °С) на межі фериту і цементиту починається перетворення $\alpha \rightarrow \gamma$ з утворенням низьковуглецевого аустеніту, в якому розчиняється цементит. Перетворення $\alpha \rightarrow \gamma$ відбувається швидше, ніж розчинення цементиту. Тому, коли вся α -фаза (ферит) перетвориться на γ -фазу (аустеніт), частина цементиту залишиться нерозчиненою, і лише після розчинення всього цементиту перетворення закінчується. Проте аустеніт, що утворився, має досить нерівномірну концентрацію вуглецю, яка зменшується від центру до периферії зерна. Лише після тривалого нагрівання або підвищення температури внаслідок дифузії аустеніт стає однорідним щодо вмісту вуглецю.

Доевтектоїдні сталі за температур вище температури A_1 мають структуру аустеніт + ферит і лише вище температури A_3 (лінія GS діаграми) набувають однорідної структури аустеніту.

У разі нагрівання заевтектоїдних сталей вище A_1 (подібно до евтектоїдних) перліт спочатку перетворюватиметься на аустеніт, а з підвищенням температури вторинний цементит розчинюватиметься в аустеніті. Вище температури A_{cm} (крива SE діаграми) розчинення цементиту закінчується і утворюється однорідний аустеніт. Оскільки аустеніт утворюється на межі фериту і цементиту, то утворювання перліту з дрібною структурою і з більшою протяжністю границь зерен відбувається швидше.

З підвищенням температури зростає швидкість утворення центрів кристалізації аустеніту, а також швидкість росту його зерен. Залежно від схильності до зростання розмірів аустенітного зерна за підвищення температури, розрізняють спадково дрібнозернисту сталь і спадково крупнозернисту. Спадковість зерна залежить від хімічного складу, умов виплавки та тверднення, неметалевих включень тощо. Такі елементи, як V, Ti, Mo, W, Al сприяють зменшенню росту зерна, а Mn, P – зростанню його розміру.

7.1.2 Перетворення аустеніту на перліт ($A \rightarrow P$)

Відбувається в процесі охолодження сталі від температур аустенітного стану до кімнатної температури. Перетворення (розпад) може відбуватися лише за температур, нижчих від критичної точки A_1 (727 °С), за умови, що вільна енергія аустеніту вища за вільну енергію продуктів його перетворення. Тобто аустеніт має бути

переохолодженням. Від ступеня переохолодження (температури), за якого відбувається перетворення, залежать швидкість перетворення та структурний стан продуктів розпаду аустеніту.

Розрізняють три основні етапи перетворення аустеніту під час охолодження:

- перетворення $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\alpha$ (ГЦК $\rightarrow$ ОЦК-гратка);
- зародження центрів кристалізації цементиту (Fe_3C);
- зростання зерен цементиту.

Внаслідок цих процесів відбувається утворення та зростання пластинчастих кристалів фериту і цементиту, що утворюють перлітну колонію. Залежно від швидкості охолодження (ступеня переохолодження) утворюються різні структури, зумовлені повнотою проходження трьох основних етапів перетворення й відповідно дисперсністю структурних складових сталі.

При швидкості охолодження $V_{ox} \leq 30$ °C/с реалізуються всі етапи перетворення і формується структура пластинчастого **перліту** з міжпластинчастою відстанню $\Delta_0 = 0,6 \dots 1,0$ мкм і твердістю 180...250 НВ. Збільшення швидкості охолодження до 50 °C/с дає змогу реалізувати перший та другий етапи перетворення повністю, а третій - лише частково. При цьому утворюється дисперсніша феритно-цементитна суміш ($\Delta_0 = 0,25 \dots 0,3$ мкм, 250...300 НВ) – **сорбіт**. При $V_{ox} = 100$ °C/с сповна реалізується лише перший етап, другий – частково, а третій зупиняється одразу ж на початку перетворення. Тому утворюється дуже дрібна структура ферито-цементитної суміші – **тростит** ($\Delta_0 = 0,1 \dots 0,15$ мкм, 350...450 НВ), будову якого можна спостерігати за великих збільшень ($\times 7000 \dots 8000$). швидкість охолодження $V_{ox} = 150 \dots 200$ °C/с дає змогу реалізувати лише перший (бездифузійний) етап перетворення з утворенням структури мартенситу (65 HRC). Перліт, сорбіт і тростит, які утворюються під час дифузійного розпаду аустеніту, є ферито-цементитними структурами пластинчастої будови, що відрізняються лише ступенем дисперсності (подрібнення).

7. 1.3 Перетворення аустеніту в мартенсит ($A \rightarrow M$)

Це перетворення має зовсім відмінну природу, не таку як при формуванні ферито-цементитних сумішей. Характерною особливістю аустенітно-мартенситного перетворення є його бездифузійність. **Мартенсит** – це пересичений твердий розчин вуглецю в α -залізі. У

разі значного переохолодження (коли швидкість охолодження вища від критичної – $V_{кр}$) вуглець не встигає виділитися з аустеніту у вигляді цементиту, як це відбувається за утворення перліту, сорбіту і троститу. Він залишається у кристалічній ґратці α -заліза, утворює пересичений твердий розчин і викликає внаслідок цього зміну ОЦК-ґратки на тетрагональну з елементарною коміркою у вигляді прямокутного паралелепіпеда.

Перетворення аустеніту у мартенсит відбувається за охолодження у певному температурному інтервалі з початком у точці M_n (рис.7.3), яка на відміну від перлітного перетворення, не залежить від швидкості охолодження для даної сталі. Зі зниженням температури дедалі більша кількість аустеніту перетворюється на мартенсит. Перетворення закінчується за температури точки M_k .



Рисунок 7.3 – Діаграма ізотермічного перетворення аустеніту евктоїдної сталі (0,8% C)

Проте навіть при цьому не відбувається повного перетворення всього аустеніту в мартенсит. Частина аустеніту, що не перетворюється, називається **залишковим аустенітом**. Характерною особливістю мартенситного перетворення є призупинення

перетворення у мартенситному інтервалі в разі зупинки безперервного охолодження (ізотермічного видержування), що супроводжується також стабілізацією аустеніту. Хімічний склад аустеніту зумовлює інтервал температур мартенситного перетворення, який знижується в разі підвищення вмісту вуглецю в сталі. перетворення аустеніту з утворенням мартенситних пластин відбувається з великою швидкістю (≈ 1000 м/с), супроводжується збільшенням об'єму, орієнтованістю структури мартенситу, виникненням напружень та їхнім зростанням зі зростанням мартенситного кристалу. Кристали (пластини) мартенситу орієнтовані до границь зерна аустеніту під кутом 60° або 120° . Для мартенситного перетворення характерно також подрібнення блочної структури, утворення мікродвійників, підвищення густоти дислокацій. Все це, разом з утворенням твердого розчину втілення з тетрагональною кристалічною ґраткою, зумовлює високу міцність ($\sigma_b = 1000 \dots 1500$) і твердість ($60 \dots 65$ HRC) мартенситу. Структура мартенситу є результатом гартування сталей.

7.2 Вплив нагріву на структуру і властивості деформованого металу

Усі внутрішні зміни під час пластичної деформації, такі як викривлення кристалічних ґраток, зростання густоти дислокацій та вакансій, зміни макро- і мікроструктури, поява текстури деформації, викликають зміцнення металу. При цьому характеристики міцності (σ_b , σ_t , твердість) зростають, а характеристики пластичності – знижуються. Зміцнення металу під дією пластичної деформації називають наклепуванням (нагартуванням).

Деформований (наклепаний) метал є термодинамічно нестійким і тому намагається перейти у більш рівноважний стан з меншим рівнем вільної енергії. Процеси, за допомогою яких може відбутися цей перехід, здійснюються шляхом дифузії атомів в металі. Тому вирішальна роль у розвитку цих процесів належить температурі, з підвищенням якої зростає рухливість атомів і спроможність наклепаного металу до самодовільної перебудови структури. При нагріванні такого металу у ньому відбуваються процеси **повернення**, **полігонізації** і **рекристалізації**, які зумовлюють повернення всіх властивостей до рівня властивостей металу до деформації.

Під час нагріву металу до порівняно низьких температур (нижче $0,8...0,3 T_{пл}$) починається процес **повернення**. Під цим розуміють підвищення структурної досконалості наклепаного металу внаслідок зменшення густоти дефектів будови, однак без помітних змін структури при спостереженні за допомогою світлого мікроскопа. Розрізняють дві стадії цього процесу: перша стадія – повернення – протікає за температур нижче $0,2 T_{пл}$, коли відбувається зменшення кількості точкових дефектів (вакансій) і невелике перегруповання дислокацій без утворення нових субграниць; друга стадія – полігонізація (від лат. *polygon* - багатокутник) – реалізується при нагріванні до більш високих температур ($0,25...0,3 T_{пл}$). Під цим розуміють фрагментацію кристалів на субзерна (полігони) з мало кутовими границями. Субзерна при подальшому підвищенні температури або тривалості нагріву прагнуть до зростання. Нагрівання до більш високої температури призводить до різкої зміни структури і властивостей деформованого металу внаслідок **рекристалізації** – процесу виникнення і росту нових недеформованих зерен. Внаслідок рекристалізації наклепування практично цілком знімається і властивості металу наближаються до вихідних. Найменшу температуру початку рекристалізації T_p , за якої протікає рекристалізація і відбувається знеміцнення наклепаного металу, називають **температурним порогом рекристалізації**. Ця температура не є постійною фізичною величиною. Температурний поріг рекристалізації знижується відповідно ступеню деформації, тривалості нагріву, величини зерна до деформації. Для технічно чистих металів він складає $0,4 T_{пл}$, для чистих знижується до $(0,1...0,2)T_{пл}$, а для сплавів твердих розчинів зростає до $0,5...0,6 T_{пл}$.

Із завершенням первинної рекристалізації у процесі подальшого нагріву відбувається **збиральна рекристалізація**. Це процес росту одних рекристалізованих зерен за рахунок інших (сусідніх) рекристалізованих зерен. У реальному металі після первинної рекристалізації зерна мають неоднакові розміри. Границі зерен викривлені, мають підвищену протяжність. Внаслідок збиральної рекристалізації зерна зростають рівномірно, більш крупні ростуть за рахунок дрібних.

За певних умов зерна можуть зростати нерівномірно, тому що ростуть і досягають великих розмірів лише окремі з них, тоді як

основна структура зберігається дрібнозернистою. Такий процес називають **вторинною рекристалізацією**.

Чим більший ступінь попередньої пластичної деформації, тим менший розмір рекристалізованого зерна. Температура та тривалість нагріву також впливають на розмір рекристалізованого зерна.

Під час нагрівання пластично деформованого металу змінюються також його структура та властивості (рис. 7.4). В інтервалі температур повернення спостерігається незначне зменшення, яке залежить від природи металу і фактичної температури нагріву. Характеристики пластичності дещо підвищуються. В області температур первинної рекристалізації різко знижуються показники міцності та значно підвищується пластичність. Первинна рекристалізація призводить до повного зняття наклепування. Починаючи з певної температури, пластичність плавно знижується, що пояснюють утворенням великого зерна внаслідок збиральної рекристалізації. На практиці для повного зняття наклепування застосовують термічну обробку за режимом рекристалізаційного відпалу.

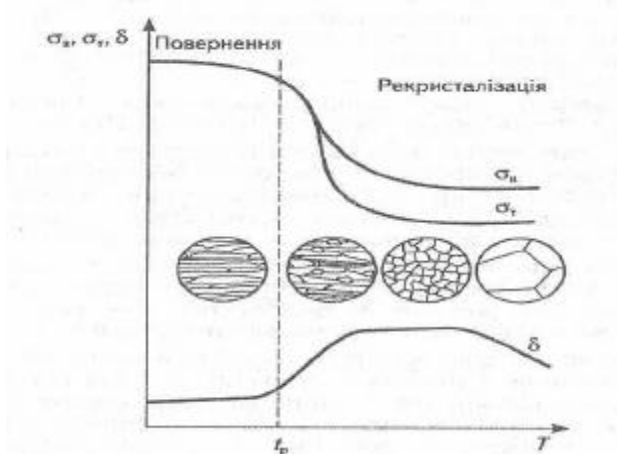


Рисунок 7.4 – Зміна характеристик міцності (σ_b , σ_t) і пластичності (δ) наклепаного металу при нагріванні; T_p – температура початку рекристалізації

8 ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ

8.1 Класифікація видів термічної обробки

Процеси термічної обробки характеризуються не лише температурою і тривалістю нагріву, швидкістю нагріву і охолодження, загальною тривалістю виробничого циклу. Вид термічної обробки перш за все визначає тип фазових і структурних змін у металі. Виходячи з цього, О. Бочвар розробив класифікацію, яка охоплює численні різновиди термічної обробки чорних і кольорових металів і сплавів. На основі класифікації О. Бочвара комісією зі стандартизації Ради Економічної Взаємодопомоги створено класифікацію видів і різновидів термообробки сталей і кольорових металів і сплавів, а також відпорну термінологію.

Згідно чинній класифікації види термічної обробки поділяються на:

- власне термічну (ТО);
- хіміко-термічну (ХТО);
- термомеханічну (ТМО).

Власне термічна обробка охоплює технологічні процеси: відпал першого роду, відпал другого роду, гартування з поліморфним перетворенням, гартування без поліморфного перетворення, відпуск, старіння. Кожен з цих видів термообробки поділяється також на різновиди, виходячи із специфіки сплавів. Вона зводиться лише до термічного впливу на метал або сплав.

Хіміко-термічна обробка поєднує в собі операції термічного і хімічного впливу з метою зміни хімічного складу, структури та властивостей поверхневого шару металу або сплаву. Різновиди хіміко-термічної обробки: цементація, азотування, нітроцементація, борування, дифузійна металізація тощо.

Термомеханічна обробка об'єднує в одному технологічному процесі операції термічного впливу і пластичної деформації у різній послідовності. Різновиди термомеханічної обробки - високотемпературна (ВТМО), низькотемпературна (НТМО), ізотормінг тощо.

8.2 Відпал

Відпал першого роду частково або повністю усуває відхилення від рівноважного стану металу, які виникли внаслідок його попередньої обробки (лиття, обробка тиском, зварювання, термообробка). Під час відпалу першого роду фазові перетворення не відбуваються. Якщо ж вони все таки мають місце, то на властивості сталі істотно не впливають. Процеси, які усувають відхилення від рівноважного стану, здійснюються самодовільне, і нагрівання при відпалі першого роду здійснюються лише для їхнього прискорення. Основні параметри такого відпалу – температура і тривалість нагріву, швидкість нагрівання і охолодження мають другорядне значення. Залежно від того, які відхилення від рівноважного стану усуваються, розрізняють такі різновиди відпалу першого роду.

Рекристалізаційний відпал використовують для зменшення твердості наклепаної холоднодеформованої сталі, підвищення її в'язкості, одержання певного розміру зерна. Сталь для цього нагрівають до температури початку рекристалізації (нижче критичної температури A_1), витримують 3...6 год. і повільно охолоджують до 500 °C і далі на повітрі. В результаті замість структури деформованого металу утворюється рівноважна дрібнозерниста, вільна від залишкових напружень структура.

Гомогенізуючий (дифузійний) відпал застосовують для вирівнювання хімічного складу та підвищення однорідності структури литої легированої сталі або для зниження схильності прокату до утворення флокенів і шиферності. Сталь для цього нагрівають вище температури точок A_3 і A_{cm} (1000...1150 °C) протягом 10...15 год. і повільно охолоджують. Внаслідок цього утворюється однорідна структура з великим зерном, яке подрібнюють під час наступної термічної обробки або при прокатуванні.

Відпал на велике зерно застосовують для поліпшення оброблюваності сталі різанням. Оскільки структури з більшим зерном обробляються легше, штучно розмір мало вуглецевої сталі збільшують нагрівом до 950...1100 °C і повільним охолодженням її разом з піччю.

Відпал другого роду базується на використанні дифузійних (нормальних) фазових перетворень при охолодженні металів і сплавів. Принципову можливість застосування до сплаву відпалу другого роду

можна визначити за діаграмою стану. Його проводять для сталей і сплавів, які мають поліморфні, евтектоїдні або перектоїдні перетворення, а також у разі перемінної розчинності у твердому стані. Практично доцільність відпалу другого роду визначає те, наскільки структурні зміни впливають на властивості сплаву. Відпал може бути здійснений з повними або частковими змінами фазового складу.

Залежно від змін, що відбуваються у фазово-структурному стані, відпал може бути:

- повним;
- неповним;
- сфероїдизуючим;
- ізотермічним.

Повний відпал застосовують для зменшення твердості, внутрішніх напружень, структурної неоднорідності, подрібнення зерна, підвищення в'язкості й пластичності, поліпшення оброблюваності сталі. За повного відпалу відбувається фазова перекристалізація феритної та перлітної складових структури при температурі на $30...50\text{ }^{\circ}\text{C}$ вище температури точки A_3 і охолодженні зі швидкістю $20...200\text{ }^{\circ}\text{C/год}$. Швидкість охолодження залежить від складу сталі, маси і форми виробів.

Неповний відпал використовують для зменшення твердості та покращання оброблюваності сталей різанням. При цьому відбувається перекристалізація лише перлітної складової структури. Після нагрівання до температури на $40...60\text{ }^{\circ}\text{C}$ вище точки A_1 , витримування і повільного охолодження утворюються перліт і ферит у доевтектоїдних сталях та перліт і цементит у заевтектоїдних. Для заевтектоїдних сталей неповний відпал використовують замість повного.

Сфероїдизуючий відпал (сфероїдизація карбідів) застосовують для зниження твердості, підвищення оброблюваності різанням високо вуглецевих та інструментальних сталей, підвищення пластичності мало- і середньовуглецевих сталей перед холодним штампуванням і волочінням. Режим такого відпалу включає нагрівання до температури, трохи вищої від температури A_1 , повільне охолодження ($30...40\text{ }^{\circ}\text{C/год}$) до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ і далі на повітрі або циклічне багаторазове нагрівання вище температури точки A_1 і охолодження нижче цієї температури. За цих умов відбувається усунення пластинчастого і

змішаного перліту та цементитної сітки, утворюється кінцева структура фериту та зернистого цементиту.

Ізотермічний відпал використовують для скорочення тривалості відпалювання прокату або заготовок після кування з легованих сталей. Здійснюють його нагріванням на $30...50\text{ }^{\circ}\text{C}$ вище температури точок A_1 або A_{cm} (для заєвтектоїдних сталей) і витриманням за цих температур. Далі прискорено охолоджують до температури найменшої стабільності аустеніту ($650...680\text{ }^{\circ}\text{C}$) та витримують ізотермічно до повного розпаду аустеніту з подальшим охолодженням на повітрі. При цьому спочатку утворюється аустеніт, а потім відбувається його ізотермічний розпад на ферито-карбідну суміш. Кінцева структура після ізотермічного відпалювання – пластинчастий перліт і ферит, а в заєвтектоїдних сталях – перліт і цементит.

Нормалізаційний відпал (нормалізація) є ефективним засобом усунення грубозернистої структури після лиття і кування. Для низько вуглецевих сталей використовується замість повного відпалу. Виливки середньовуглецевих сталей нормалізують замість гартування для зменшення короблення та тріщиноутворення. Нормалізацію з високим відпуском замість повного відпалу використовують для виправлення структури легованих сталей. Нормалізацію здійснюють при температурах A_3 (для доєвтектоїдних сталей) або A_{cm} (для заєвтектоїдних) з наступним охолодженням на спокійному повітрі ($V_{ох} \approx 30\text{ }^{\circ}\text{C/хв.}$). при цьому отримують дрібне зерно і досягають рівномірного розподілу структурних складових сталей. Порівняно з відпалюванням, нормалізація є більш дешевою термічною операцією, оскільки у цьому випадку термічні печі використовують лише для нагрівання та витримування сталі при температурі нормалізації.

8.3 Гартування

Це термічна операція, яка зводиться до нагрівання сталі до температури вище критичної (A_3 – для доєвтектоїдної сталі та A_1 – для заєвтектоїдної) або до температури розчинення надлишкових фаз і наступного швидкого охолодження зі швидкістю, що перевищує критичну. **Критичною швидкістю гартування** ($V_{кр}$) називають мінімальну швидкість охолодження, необхідну для розпаду аустеніту в інтервалі температур маргенситного перетворення. Тобто швидкість

оохолодження повинна бути досить великою, для того щоб при зниженні температури не встигли відбутися зворотні фазові перетворення, пов'язані з дифузією або самодифузією. У цьому – принципова відмінність гартування від відпалу другого роду. Мета гартування – одержання нерівноважної структури і підвищення за рахунок цього міцності та твердості сталі.

Існують два різко відмінних види гартування:

- з поліморфним перетворенням;
- без поліморфного перетворення.

Гартування з поліморфним перетворенням – це термічна обробка, за якої головним процесом є мартенситне перетворення високотемпературної фази. Тому таку термічну обробку називають **гартуванням на мартенсит**. Таке гартування може бути застосоване практично до будь-яких металів і сплавів, здатних при охолодженні перебудувати кристалічну ґратку. Необхідну для проведення гартування швидкість охолодження забезпечують використанням певних середовищ з високою охолоджувальною здатністю (вода, масло, розчин солей тощо).

Гартування без поліморфного перетворення – це термічна обробка, яка фіксує при більш низькій температурі стан сплаву, властивий йому за високих температур. Воно зводиться до нагрівання сталі або іншого сплаву до температури розчинення надлишкових фаз, витримування і швидкого охолодження для запобігання виділень надлишкових фаз з пересиченого твердого розчину. Таку обробку здійснюють для одержання гомогенної структури.

Залежно від температури нагрівання під гартування (аустенізації) розрізняють:

- повне;
- неповне гартування.

Повне гартування застосовують для обробки доєвтектоїдних сталей. При цьому сталь нагрівають на 30...60 °С вище температури точки A_3 (вище лінії GS на діаграмі стану) для отримання вихідної структури аустеніту. Неповне гартування застосовують для заєвтектоїдних сталей. Для гартування сталь нагрівають в інтервалі температур A_1 ... A_3 (на 30...50 °С вище A_1 , тобто до 760...780 °С). Вихідна структура при цьому – аустеніт з цементитом. Цементит зберігається і в загартованій структурі сталі, оскільки має вищу твердість порівняно з мартенситом.

При гартуванні слід розрізняти і розуміти два важливі поняття:

- загартованість;
- прогартованість сталі.

Загартованість – це здатність сталі набувати максимальної твердості внаслідок гартування. Загартованість визначає вміст вуглецю у сталі. Так, низьковуглецеві сталі (до 0,2% С) практично не загартовуються, їхня твердість внаслідок гартування практично не підвищується.

Прогартованість – це глибина загартованої зони або відстань від поверхні зразка сталі до шару, структура якого складається приблизно з однакових об'ємів мартенситу і трооститу. Мірою прогартованості служить критичний діаметр (D_k). Це максимальний діаметр циліндричного зразка, що наскрізь прогартувався у даному охолоджувальному середовищі. Прогартованість кожної сталі визначають експериментально.

Залежно від потрібного комплексу властивостей виробів, їх призначення та хімічного складу застосовують різні способи гартування:

- **гартування в одному охолоджувальному середовищі** - переважно для деталей простої форми. Це безперервне гартування, охолоджуючим середовищем у більшості випадків служить вода або масло. Кінцева структура мартенсит і залишковий аустеніт, або мартенсит, карбіди і залишковий аустеніт залежно від вмісту вуглецю в сталі;

- **переривчасте гартування** здійснюють у двох охолоджувальних середовищах: спочатку деталь швидко охолоджують у воді до температури дещо вище точки M_n , а потім швидко переносять до менш інтенсивного охолоджувача (масла, повітря), де охолоджують до 20 °С. У результаті використання другого охолоджуючого середовища зменшуються внутрішні напруження, які б мали місце за умов швидкого охолодження в одному середовищі (воді), в тому числі й в області температур мартенситного перетворення;

- **сходинкове гартування** використовують для зменшення напружень, деформації та запобігання утворенню тріщин в інструменті з вуглецевих і легованих сталей. Сталь, нагріту до температури гартування, охолоджують у середовищі з температурою, дещо вищою M_p (180...250 °С), і витримують у ньому порівняно

короткий час. Далі сталь охолоджують на повітрі до нормальної температури. Внаслідок видержування у середовищі гартування досягають вирівнювання температури за перерізом виробу, проте перетворення аустеніту з утворенням бейніту не відбувається. Мартенситне перетворення відбувається під час охолодження на повітрі (але значно повніше), внаслідок чого сталь зберігає більше залишкового аустеніту порівняно з режимом безперервного гартування;

- **ізотермічне (бейнітне) гартування** здійснюють охолодженням сталі у середовищі з температурою вище M_n (у розплавах солей), з ізотермічним витримуванням у ньому до повного або неповного перетворення аустеніту з наступним охолодженням на повітрі. Кінцева структура – бейніт або бейніт і карбіди, іноді також мартенсит і залишковий аустеніт. Таке гартування використовують для зменшення теплових і структурних напружень, запобігання тріщин і деформації, підвищення конструктивної міцності;

- **гартування з самовідпуском** здійснюють охолодженням лише частини або поверхні виробу у воді або маслі, далі виріб охолоджується на повітрі. Загартована зона при цьому відпускається за рахунок тепла серцевини або тієї частини, що не була занурена в охолоджуючу рідину. Таке гартування застосовують для зменшення залишкових напружень і як заміну наступного низького відпуску, а в окремих випадках – для місцевого гартування, при індукційному поверхневому гартуванні;

- **поверхнєве гартування** здійснюють для одержання твердої зносостійкої поверхні й збереження в'язкої серцевини. При індукційному або газоплазмовому нагріванні поверхні виробу серцевина після охолодження лишається незагартованою;

- **гартування з обробкою холодом** застосовують для усунення залишкового аустеніту, підвищення твердості й зносостійкості, стабілізації розмірів виробів. Обробку холодом виконують одразу після гартування, щоб уникнути стабілізації аустеніту при видержуванні за нормальних температур. Охолодження виробів здійснюють до температури нижче 0°C ($-30\ldots-70^\circ\text{C}$), але в інтервалі $M_n - M_k$ для додаткового перетворення аустеніту на мартенсит. Це підвищує твердість сталей з $0,8\ldots 1,1\%$ C на $1\ldots 3$ HRC. Проте зростають напруження, тому після обробки холодом вироби піддають відпуску. Таку обробку використовують в основному для

вимірювального інструменту, пружин і деталей з цементованих високолегованих сталей, що після гартування зберігають значну кількість залишкового аустеніту.

Під час термічної обробки, перш за все при гартуванні сталі, відбуваються об'ємні зміни, які залежать від температури, швидкості охолодження і структурних перетворень. Це призводить до виникнення внутрішніх напружень, які зумовлюють утворення тріщин, короблення виробів тощо. Розрізняють такі внутрішні напруження:

- *внутрішні напруження першого роду (зональні)* виникають між різними частинами виробу і залежать від швидкості та рівномірності охолодження, розмірів і форми виробу, а також властивостей сталі. Такі напруження інколи називають термічними напруженнями;

- *внутрішні напруження другого роду* виникають між фазами внаслідок різних коефіцієнтів їхнього розширення або утворення нових фаз з різними об'ємами. Оскільки ці напруження виникають між окремими елементами структури, їх називають структурними напруженнями;

- *внутрішні напруження третього роду* виникають в об'ємах, що відповідають кільком елементарним коміркам кристалічної ґратки. У цілому будь-які напруження, зрештою, викликають однаковий ефект, створюючи пружні деформації та викривлення кристалічної ґратки сплавів, зумовлюють зменшення конструкційної міцності виробів. Загартована сталь після охолодження завжди знаходиться у структурно напруженому стані (залишкові напруження). Необхідним і надійним заходом для зменшення негативного впливу залишкових напружень є відпуск. Після проведення відпуску при 550 °С протягом 15..30 хв. напруження гартування практично зникають.

Відпуск загартованої сталі є завершальною операцією її термічної обробки, яка здійснюється для надання сталі потрібних механічних властивостей.

8.4 Відпуск

Відпуск – це нагрівання загартованої сталі до температур, нижчих A_1 , витримування її за цієї температури та поступове охолодження до кімнатної температури. Мета відпуску – переведення

нерівноважної структури загартованої сталі у більш рівноважний стан, підвищення в'язкості та пластичності сталі, зменшення її твердості. Відпуском також знімають внутрішні напруження, які виникають під час гартування. Основний вплив на властивості сталі має температура відпуску. Залежно від температури розрізняють три види відпуску.

Низькотемпературний (низький) відпуск здійснюють при нагрівання сталі до 150...250 °С протягом 1,5...3 год. Під час цього тетрагональний мартенсит гартування перетворюється на мартенсит відпуску (кубічний), дещо знижується твердість і крихкість, зменшуються внутрішні напруження гартування. Такому відпуску піддають різальні та вимірювальні інструменти з вуглецевих і легированих сталей, а також вироби після цементації.

Середньотемпературний (середній) відпуск здійснюють при 300...450 °С для обробки деталей, що працюють за умов тертя і динамічних навантажень (штампи, пружини, ресори). Структура сталі для середнього відпуску – тростит відпуску або троостито-мартенсит, твердість сталі 40...50 HRC. Це забезпечує високий поріг пружності, в'язкості та опір розриву сталі.

Високотемпературний (високий) відпуск проводять при 500...680 °С. При цьому відбувається збільшення розміру і сфероїдизація дисперсних карбідних часток, зростає феритне зерно і утворюється сорбіт відпуску. Високий відпуск створює найкраще співвідношення міцності й в'язкості сталі. Тому термічну обробку, яка складається з гартування та високого відпуску, називають **поліпшенням**.

Високий відпуск застосовують для обробки деталей з середньовуглецевих (0,3...0,5% С) і спеціальних сталей, що працюють при підвищених і динамічних навантаженнях (вали, осі, елементи кріплення). Високий відпуск протягом 1...2 год. повністю знімає залишкові напруження, що виникають при гартуванні. залежно від габаритів виробу тривалість високого відпуску може складати 1...6 год.

Після гартування, швидкого охолодження після відпуску або після холодної пластичної деформації сталі утворюється нерівноважна структура із мікрооб'ємами, пересиченими вуглецем і азотом.

Старіння – це процес зміни властивостей сталі, зумовлений виділенням надлишкового вуглецю (азоту) у вигляді дуже дрібних скупчень карбідів або нітридів. Старіння здійснюють нагріванням

сталі до певної температури, витримуванням при цій температурі з наступним охолодженням. Така обробка сприяє підвищенню твердості й міцності, зниженню пластичності та ударної в'язкості, а також зменшенню внутрішніх напружень. Старіння може бути **природним** (за кімнатної температури) і **штучним** (при нагріванні до певної температури). Штучне старіння сталей здійснюють при 200...300 °С, тривалість нагрівання залежить від хімічного складу сталей. Старіння після термічної обробки називають **термічним старінням**, а після холодної пластичної деформації – **деформаційним старінням**.

Результати старіння можна розглядати по-різному. В одних випадках старіння є позитивним процесом і його використовують для зміцнення деталей з пружинних сталей, які повинні забезпечити високі пружні властивості та міцність; при термічній обробці швидкорізальних сталей, а також сплавів алюмінію, магнію, Титану тощо. В інших випадках старіння є негативним і може зумовлювати зниження ударної в'язкості та порога холодноламкості, руйнування конструкцій, залізничних рейок тощо.

Якщо під час експлуатації сталі можливе її нагрівання, коагуляція фаз, що виділились, і зниження міцності, то при старінні намагаються одержати такий рівень властивостей, що буде стабільним за даних умов експлуатації. Таке старіння називають **стабілізацією**.

8.5 Термічна обробка чавуну

Особливістю термічної обробки чавунів на відміну від сталі є необхідність строгого врахування структурного стану та властивостей вихідного чавуну. Специфічними процесами термічної обробки чавунів є графігізація, тобто розкладання цементиту для зменшення кількості зв'язаного вуглецю; розчинення графіту і збагачення вуглецем аустеніту, що зумовлює збільшення кількості перліту у структурі чавуну.

Термічна обробка чавунів сприяє зменшенню внутрішніх напружень у виливках, одержанню стабільної структури і розмірів, підвищенню твердості та стійкості проти спрацювання у спосіб гартування та відпуску, надає чавуну (білому) підвищеної міцності та пластичності відпалюванням.

Основними видами термічної обробки сірого чавуну є:

- відпал;

- нормалізація;
- гартування (об'ємне, поверхнєве);
- відпуск.

Низькотемпературний відпал (500...600 °С), або штучне старіння, протягом 1...8 год. здійснюють повільним нагріванням (70...100 °С/год.) і повільним охолодженням з пічкою (20...50 °С/год.) до 250 °С і далі – на повітрі. Застосовують його для зняття напружень, запобігання деформації й тріщиноутворення під час механічної обробки та експлуатації.

Середньотемпературний відпал (680...750 °С) - графізуючий, застосовують для зменшення твердості, підвищення пластичності та ударної в'язкості, поліпшення оброблюваності. Залежно від потрібної структури тривалість відпалювання змінюють у межах 1...4 год.

Високотемпературний відпал (850...950 °С) - графізуючий (0,5...5,0 год.), використовують для зменшення твердості та поліпшення оброблюваності. Здійснюють повільним нагріванням і охолодженням з пічкою до 250 °С, далі – на повітрі. Нормалізацію (охолодження на повітрі) від 850...950 °С застосовують для підвищення твердості та зносостійкості.

Гартування у воді або маслі від 850...930 °С з витримуванням при нагріванні 0,5...3,0 год. використовують для підвищення твердості до 500 НВ, міцності та зносостійкості. Ізотермічне гартування чавуну переважає традиційні види підвищення твердості та зносостійкості виробів, проте ускладнює обробку різанням. Воно зводиться до аустенізації та наступного ізотермічного розпаду аустеніту в проміжній області С-подібної діаграми з утворенням переважно структури бейніту.

Ізотермічне гартування чавуну складається з двох етапів:

- аустенізації при 820...900 °С, витримування за цієї температури 0,2...1,5 год.;
- переохолодження аустеніту з наступним розпадом його в ізотермічних умовах в інтервалі температур від 250...300 до 450...500 °С.

Швидко нагріваючи поверхню чавуну до 840...950 °С струмами високої частоти, газовим полум'ям тощо і охолоджуючи у воді, маслі та інших охолоджувальних середовищах здійснюють **поверхнєве**

гартування. Це забезпечує підвищення твердості до 55 HRC та стійкості проти спрацювання.

Відпуск виробів із сірих чавунів застосовують для усунення термічних напружень, підвищення в'язкості та пластичності. При цьому температура відпуску становить 250...600 °C, тривалість – 1...3 год. залежно від потрібної твердості. Термічну обробку білого чавуну проводять для одержання з нього ковкого чавуну з високою міцністю та пластичністю, застосовуючи для цього спеціальний режим графітізуючого відпалювання. Для цього використовують білий чавун з досить вузьким інтервалом вмісту легуючих елементів: 2,4...2,8% C; 0,8...1,4% Si; < 1% Mn; ≤ 0,1% S; ≤ 0,1% P.

Під час графітізуючого відпалу цементит у чавуні розпадається з утворенням фериту і графіту або перліту і графіту. феритний ковкий чавун на зламі має темний колір, тому його називають **чорносердечним**. Злам перлітного чавуну сірий і його називають **білосердечним**.

Сучасний процес графітізуючого відпалу складається з двох стадій. Перша стадія – рівномірне нагрівання до 950...1000 °C. За цієї температури відбувається графітізація надлишкового цементиту (10...15 год.), потім чавун охолоджують з піччю до 740 °C зі швидкістю 70...100 °C/год.

Друга стадія – ізотермічна обробка за такої температури (протягом майже 30 год.), після чого чавун охолоджують на повітрі. На цій стадії графітізується цементит перліту. Остаточна структура після графітізуючого відпалювання складається з фериту та пластівчастого графіту.

Перлітний ковкий чавун отримують у результаті неповного відпалювання: після першої стадії графітізації при 950...1000 °C чавун охолоджується з піччю, друга стадія графітізації не проводиться. Для підвищення в'язкості перлітний чавун піддають сфероїзації при 700...750 °C, за якої отримують структури зернистого перліту.

При термічній обробці ковких чавунів для підвищення міцності та зносостійкості їх піддають гартуванню з відпуском або нормалізації. Гартування здійснюють від 850...900 °C з охолодженням у маслі або воді, відпуск – залежно від потрібної твердості (у більшості випадків при 650...680 °C). Гартування можна здійснювати також після першої стадії графітізації по досягненні температури

850...880 °C з наступним високим відпуском. застосовують також режим поверхневого гартування.

Нормалізацію ковкого чавуну здійснюють нагріванням до 850...900 °C з витримуванням 1...1,5 год. і наступним охолодженням на повітрі. Якщо нормалізовані вироби мають підвищену твердість, їх після цього піддають високому відпуску при 650...680 °C протягом 1...2 год.

Термічну обробку високоміцного чавуну проводять для того, щоб зняти внутрішні напруження (на 80...90%) виливків складної форми. Для цього їх повільно нагрівають до 500 °C, витримують за цієї температури 2...3 год. і охолоджують з піччю до 200 °C, а далі – на повітрі.

9 ХІМІКО-ТЕРМІЧНА ОБРОБКА СТАЛІ

Хіміко-термічна обробка (ХТО) об'єднує операції хімічного і термічного впливу з метою цілеспрямованої зміни складу, структури та властивостей поверхневого шару сталі. Здійснюють ХТО дифузійним шляхом, насичуючи поверхню деталі відповідним елементом (C, N, Al, B, Cr, Si тощо) в атомарному стані з оточуючого середовища при високій температурі. Основні технологічні параметри ХТО: температура; тривалість насичення. Основні процеси: дисоціація; адсорбція; дифузія.

Дисоціація – це розпад молекул насичуючого середовища та утворення активних атомів дифундуючого елемента. утворення активних атомів може відбуватись у насичуючому середовищі біля поверхні або безпосередньо на поверхні металу. Ступінь розпаду молекул речовини (%) називається **ступенем дисоціації**.

Адсорбція (сорбція) – складний і нестационарний процес поглинання поверхнею металу активних атомів насичуючого елемента, протікає на границі розділу середовище – поверхня металу. При збільшенні тиску насичуючого середовища кількість адсорбованих атомів збільшується.

Дифузія – процес проникнення насичуючого елемента вглиб металу. Характеризує її коефіцієнт дифузії (D), який дорівнює кількості речовини, що про дифундувала через площу 1 см^2 за 1 с при перепаді концентрації по обидві сторони площадки, що дорівнює одиниці (і має розмірність $\text{см}^2/\text{с}$). Оскільки хіміко-термічна обробка за своєю фізичною природою є дифузійним процесом, прискорити його можна за рахунок підвищення температури.

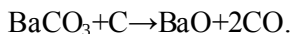
Види ХТО класифікують відповідно до певного насичуючого елемента і агрегатного стану насичуючого середовища (карбюризатора). Основними видами ХТО є дифузійне насичення вуглецем – цементация, азотом – азотування, азотом і вуглецем одночасно – ціанування та нітроцементация, дифузійна металізація алюмінієм – алітування, хромом – хромування. Залежно від агрегатного стану насичуючого середовища (твердий, рідкий, газоподібний) розрізняють процеси газової цементації, газового азотування і нітроцементації, цементації у твердому карбюризаторі, рідкого ціанування, борування.

9. 1 Цементация

Цементация – це поверхневе насичення мало вуглецевої сталі (0,1...0,25%) або легованих сталей (типу 18ХГТ, 15ХФ, 20ХГР, 12ХНЗА, 20ХН та ін.) вуглецем з метою одержання високої твердості поверхні та в'язкої серцевини виробів. Насичуючі суміші (карбюризатори), багаті на вуглець, можуть бути у твердому, рідкому і газоподібному стані. При призначенні режимів цементації (температура, час) враховують хімічний склад сталі та умови експлуатації деталі.

Для цементації у твердому карбюризаторі використовують суміші деревного вугілля у вигляді зерен розміром 3...7 мм (75...90%) з вуглекислими солями (10...25%) барію або натрію. Дифузійне насичення виробів здійснюють у засипці карбюризатора в герметизованому об'ємі при температурі вище 900 °С протягом кількох годин. Присутність малої кількості кисню сприяє утворенню оксиду вуглецю за реакцією: $2C + O_2 = 2CO$, який, контактуючи з залізом, розпадається з утворенням CO_2 і атомарного вуглецю $2CO \rightarrow CO_2 + C_{ат.}$

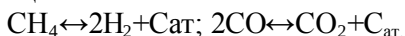
Добавки вуглекислих солей активізують карбюризатор, збагачують насичуючу атмосферу оксидом вуглецю в цементаційному контейнері:



Швидкість цементації при 950 °С складає 0,1 мм/год. Цей вид цементації застосовують не часто.

Для цементації у рідкому стані деталь, що підлягає обробці, занурюють у розплави солей (наприклад, $NaCN$, Na_2CO_3 , KCl , $BaCl_2$, SiC) при 930...950 °С. У розплавленій суміші солей сталі насичуються вуглецем за рахунок виділення атомарного вуглецю.

Найпоширеніший спосіб газової цементації – з використанням метану CH_4 , пропану C_3H_8 , оксиду вуглецю CO тощо - зводиться переважно до двох реакцій:



Основні карбюризатори газової цементації – природний, генераторний та світильний гази. Цей процес здійснюють при 900...950 °С, при цьому у 2...3 рази скорочується час на вуглецювання, зростають можливості регулювання й контролю за процесом.

За *глибину цементації* умовно приймають відстань від поверхні деталі до половини зони, у структурі якої спостерігається приблизно однакова кількість перліту та фериту (1...2 мм). Вміст вуглецю у цементованому шарі визначає межа його розчинності в аустеніті за даної температури (лінія *SE* діаграми Fe-Fe₃C). Зазвичай цементацію здійснюють за температур, вищих A_3 , оскільки в α -залізі вуглець майже не розчиняється. Оптимальний температурний інтервал цементації 900...950 °C.

Рекомендований середній вміст вуглецю в шарі повинен відповідати складу евтектоїдної сталі (0,85% C), а у зовнішньому шарі – не перевищувати 1,1..1,2%. У разі перевищення цієї кількості утворюється сітка вторинного цементиту, що призводить до окрихчення цементованої сталі. Нормальну структуру цементованого шару за умов повільного охолодження після насичення характеризує плавне зниження вмісту вуглецю. Біля поверхні (0,8...1,1% C) цементований шар має перлітно-цементитну структуру (так звану евтектоїдну зону), далі – евтектоїдну зону з вмістом вуглецю приблизно 0,8% з перлітною структурою і, нарешті, доевтектоїдну зону (вміст вуглецю менше 0,7%) з ферито-перлітною структурою, яка поступово переходить у вихідну структуру низько вуглецевої сталі.

Після цементації вироби піддають термічній обробці – гартуванню та низькому відпуску. Цим забезпечується утворення структури дисперсного високо вуглецевого мартенситу поверхні, подрібнення зерна серцевини і зняття внутрішніх напружень. цементація, гартування і низький відпуск надає виробам високій поверхневій твердості та зносостійкості, а також підвищення ударної в'язкості серцевини. Залежно від хімічного складу вихідної сталі твердість поверхні після такої обробки має становити 58...62 HRC, а серцевини – 20...35 HRC.

9.2 Азотування

Азотування – це процес дифузійного поверхневого насичення сталевих виробів азотом у газоподібному або рідкому середовищі. Температурний діапазон азотування становить 470...600 °C. Відповідно до діаграми Fe-N залізо і азот утворюють кілька фаз: α -фаза – азотистий ферит (вміст азоту при 20 °C становить приблизно 0,015%, при 591 °C – 0,1%); γ' -фаза – твердий розчин на основі

нітриду заліза Fe_4N (5,6...5,95% N_2); ϵ -фаза – твердий розчин на основі нітриду Fe_2N (8...11,2% N_2); γ -фаза – твердий розчин азоту в γ -залізі (існує вище температури евтектоїдного перетворення 591 °C).

Отримані при азотуванні шари складаються з поверхневої нітридної зони та дифузійного підшару (зони внутрішнього азотування), що забезпечують широкий діапазон фізико-механічних властивостей азотованих виробів. Залежно від умов експлуатації виробів розрізняють азотування для підвищення поверхневої твердості, зносостійкості, втомної міцності та азотування для підвищення корозійної стійкості.

Азотування для підвищення поверхневої твердості проводять при 500...520 °C протягом 24...90 год., вміст азоту в поверхневому шарі біля 10...12%, глибина насичення 0,3...0,6 мм, твердість 1000...1200 HV. Для підвищення твердості та зносостійкості використовують спеціальні сталі (нітралої), до складу яких входять елементи, що утворюють нітриди (CrN , MoN , AlN), наприклад сталь 38ХМЮА. Для підвищення втомної міцності звичайні леговані сталі азотують з нітридоутворюючими елементами.

Підвищення корозійної стійкості досягають азотуванням деталей з різних сталей (переважно з вуглецевих). Оскільки немає потреби у високій твердості, то температуру процеси вибирають високою (600...700 °C), а тривалість азотування складає від 15 хв. до 10 год. на поверхні виробів утворюється тонкий шар (0,01...0,03 мм) ϵ -фази високої корозійної стійкості.

Азотування здійснюють на готових виробах після остаточної термічної обробки. Оптимальною структурою для азотування є сорбіт, який зберігається у серцевині виробів і після ХТО, забезпечуючи її підвищену в'язкість і міцність. Тому деталі перед азотуванням піддають зміцнюючій термічній обробці – гартуванням з високим відпуском.

Процес азотування також застосовують і при обробці виробів з високоміцних чавунів і титанових сплавів.

9.3 Ціанування та нітроцементгація

Насичення поверхні виробів одночасно вуглецем і азотом в розплавлених ціаністих солях (NaCN , KCN , $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$) називають **ціануванням**, а в газовому середовищі – **нітроцементгацією**.

Співвідношення вуглецю і азоту в дифузійній зоні можна регулювати, змінюючи склад середовища та температуру процесу. Розрізняють низькотемпературне (540...560 °C), середньо температурне (820...860 °C) та високотемпературне (920...960 °C) ціанування. За підвищених температур поверхня насичується вуглецем більше ніж азотом, тобто процес наближається до цементації. Після такого насичення вироби піддають гартуванню з низьким відпуском. Поверхневий шар після високотемпературного ціанування містить 0,8...1,2% C і 0,2...0,3% N. У разі ціанування при середніх і низьких температурах вміст азоту в дифузійному шарі відпо-відно зростає. Негативним явищем ціанування є отруйність ціанових солей та висока вартість процесу.

Нітроцементацію (газове ціанування) сталей здійснюють в ендотермічній атмосфері (що містить науглецьовувальний газ), до якої додають аміак. Розрізняють високотемпературну (800...870 °C) та низькотемпературну (560...580 °C) нітроцементацію. Глибина насичення залежить від температури та тривалості (2...15 год.) процесу. Порівняно з газовою цементацією нітроцементація має такі переваги:

- низька температура процесу;
- менше зерно;
- менша деформація та короблення;
- підвищена корозійна стійкість;
- стійкість проти спрацювання.

9.4 Дифузійна металізація

Дифузійна металізація – це процес, під час якого відбувається насичення поверхні сталевих виробів різними металами. Процес насичення алюмінієм називають алітуванням, хромом – хромуванням тощо. Розрізняють дифузійну металізацію у твердих, рідких і газоподібних середовищах.

Металізаторами твердої металізації служать сплави заліза з високим вмістом потрібного елемента (хрому, алюмінію, кремнію) – феросплави з добавками хлористого амонію (NH_4Cl). Внаслідок реакції металізатора з HCl або Cl_2 утворюється летюча сполука хлору з металом (AlCl_3 , CrCl_2 , SiCl_4), яка при контакті з поверхнею металу дисоціює з утворенням вільних атомів насичуючого елемента.

Якщо вироби занурюють у розплавлений метал, то відбувається рідка металізація, газова ж металізація відбувається у газових середовищах – хлоридах різних металів.

Оскільки, на відміну від вуглецю і азоту, атоми металів утворюють із залізом тверді розчини заміщення, дифузія відбувається значно повільніше, а дифузійні шари утворюються у десятки й сотні разів тоншими. Це не сприяє значному поширенню процесів дифузійної металізації у зв'язку з тривалістю процесу та необхідністю застосування високих температур (1000..1200 °С). Проте дифузійна металізація дає змогу одержувати вироби зі звичайних вуглецевих сталей з високою жаростійкістю (хромування, алітування, силіціювання) до температур 1000...1100 °С або з високою твердістю до 2000 HV (бурювання) і стійкістю проти спрацювання.

9.5 Хіміко-термічна обробка чавуну

Азотування. Для азотування використовують переважно сірі чавуни, леговані хромом, нікелем, молібденом та іншими нітридоутворюючими елементами, а також високоміцний чавун. азотування чавунів роблять для підвищення твердості до 600...1000 НВ, зносостійкості та корозійної стійкості в газовому середовищі. Процес здійснюють при 550...580 °С, тривалість (50...70 год.) залежить від потрібної глибини азотованого шару, далі деталі охолоджують з піччю. Сірі чавуни попередньо відпалюють при 950...1000 °С протягом 4...12 год. для розпаду цементиту. Для надання металевій основі після відпалу високих механічних властивостей чавун гартують від 800..850 °С у маслі з короткочасним відпуском при 600 °С.

Перспективним є також процес азотування у тліючому розряді. Таке азотування значно підвищує стійкість за умов тертя і зношування, втомну міцність при знакозмінному вигині. дифузійний шар, що утворюється при цьому, не крихкий і добре скріплений з дифузійним підшаром.

Алітування. Насичення виробів з чавуну алюмінієм здійснюють для підвищення жаротривкості. Застосовують такі самі режими, як і за обробки сталей. Найбільш поширене алітування чавуну в порошкових сумішах фероалюмінію протягом 2...6 год. при 950...1050 °С після

повільного нагрівання (до 500 °С). Після алітування вироби охолоджують з піччю або на повітрі.

Так само здійснюють **хромування** у твердому (10...12 год.) або газовому (5 год.) середовищах. Це забезпечує твердість поверхні 1600 НВ, підвищення жаростійкості та корозійної стійкості чавунів.

Для підвищення кислотостійкості та твердості поверхні ковкого і сірого чавунів застосовують **силіціювання** виробів з них у твердих або газових середовищах при 1000...1100 °С. Для отримання шару завтовшки 0,5...0,8 мм на виливках ковкого чавуну потрібна тривалість насичення 20...25 год. За цей час на виливках сірого чавуну утворюється шар завтовшки 0,1 мм. Найкращі результати при силіціюванні одержують на ковких чавунах, задовільні – на сірих.

Для полегшення механічної обробки чавуну різанням використовують **сульфидування** його виливків. Здійснюють його шляхом повільного нагрівання до 550...600 °С в середовищах, що містять сірку. Для отримання дифузійного шару завтовшки 0,3 мм тривалість насичення повинна складати 3 год. охолодження після хіміко-термічної обробки здійснюють на повітрі.

10 НЕМЕТАЛЕВІ МАТЕРІАЛИ

До неметалевих матеріалів відносять пластмаси, гуми, деревину, клеї, лакофарбові матеріали тощо. В машинобудуванні неметалеві матеріали широко використовують для виготовлення з них різноманітних виробів, а також як заміники металів. неметалеві матеріали забезпечують необхідні механічні властивості, хімічну стійкість, водо- та газонепроникність, високі ізоляційні властивості та інші цінні якості.

10.1 Полімери

Полімерами називають речовини, макромолекули яких складаються з численних елементарних ланок (мономерів) однакової структури. Властивості цих речовин визначаються не тільки хімічним складом молекул, але і їх взаємним розташуванням і будовою.

Макромолекула полімеру – це ланцюг, що складається з окремих ланцюжків. Поперечний переріз ланцюга дорівнює кільком ангстремам, а довжина – кільком тисячам ангстрем. Тому макромолекулам полімеру властива гнучкість, яка є однією з основних їх особливостей.

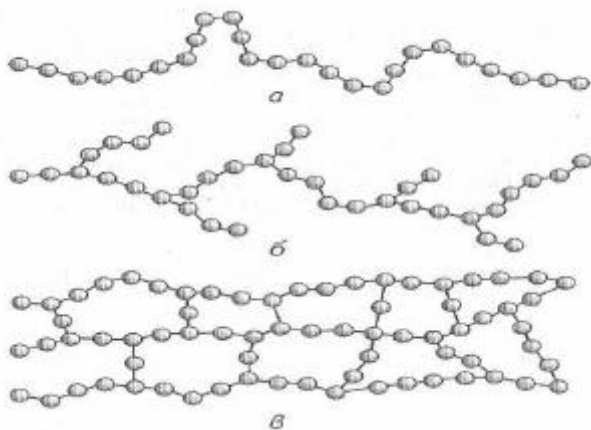
Натуральний каучук, целюлоза, слюда, азбест, природний графіт – усі вони є природними полімерами. Однак основною групою є синтетичні полімери, які отримують в процесі хімічного синтезу з низькомолекулярних сполук. Синтезом можна отримувати полімери з різноманітними властивостями і навіть створювати матеріали із заздалегідь заданими характеристиками (властивостями). Своєрідність властивостей полімерів зумовлена структурою їх макромолекул.

За формою макромолекул полімери поділяються на:

- лінійні;
- розгалужені;
- сігчасті (плоскі, просторові).

Лінійні макромолекули полімеру мають довгу зигзагоподібну форму або є закрученими в спіраль ланцюжками (рис.10.1). Гнучкі макромолекули з високою міцністю вздовж ланцюга і слабкими міжмолекулярними зв'язками забезпечують еластичність матеріалу, здатність його розм'якшуватися при нагріванні, а при охолодженні знову тверднути. Більшість таких полімерів розчиняються у певних

розчинниках. Лінійні полімери є найбільш придатними для отримання волокон і плівок (наприклад, поліетилен, поліаміди та інші).



а – ліній на; б – розгалужена; в - сітчаста
Рисунок 10.1 – Форми макромолекул полімерів

Сітчасті (просторові) полімери мають високу пружність (наприклад, м'які гуми). Густосітчасті (просторові) полімери відрізняються твердістю, підвищеною теплостійкістю, нерозчинністю. Полімери можуть бути в аморфному та кристалічному стані. При переході полімеру з аморфного до кристалічного стану суттєво змінюються його фізико-механічні властивості, підвищуються міцність та теплостійкість. До полімерів, що кристалізуються, відносяться поліетилен, поліпропілен, поліаміди тощо. Кристалізація їх здійснюється в певному інтервалі температур. За звичайних умов повної кристалізації не відбувається. В зв'язку з цим реальні полімери мають двофазну структуру: нарівні з кристалічною фазою є й аморфна. Кристалічний стан надає полімеру підвищену теплостійкість, велику міцність.

За відношенням до нагріву полімери поділяють на термопластичні і термореактивні:

- **термопластичні полімери** при нагріванні розм'якшуються (навіть плавляться), а при охолодженні тверднуть. Цей процес є зворотнім. Структура макромолекул таких полімерів лінійна або

розгалужена. Типовими представниками термопластів є поліетилен, полістирол, поліамід та інші;

- **термореактивні полімери** на першій стадії утворення мають лінійну структуру і при нагріванні розм'якшуються, потім внаслідок хімічних реакцій тверднуть (утворюють просторову структуру) і надалі залишаються твердими. Твердий стан полімеру називається термостабільним. Прикладом термореактивних полімерів можуть служити фенол формальдегідна, гліфталева та інші смоли.

Механічні властивості полімерів (міцність, пружність) залежать від структури, фізичного стану, температури тощо. Полімери можуть знаходитися в трьох фізичних станах: склоподібному, високоеластичному і в'язкотекучому:

- **склоподібний стан** характеризується тим, що атоми, які входять до складу молекулярного ланцюга, здійснюють коливальні рухи навколо положення рівноваги; рух ланцюгів і переміщення макромолекул не відбувається;

- **високоеластичний стан** властивий тільки високомолекулярним полімерам і характеризується здатністю матеріалу до великих зворотних змін форми при невеликих навантаженнях (ланцюги коливаються і макромолекула набуває здатності згинатися);

- **в'язкотекучий стан** нагадує рідкий стан, але відрізняється від нього дуже великою в'язкістю. Зі зміною температури лінійний або розгалужений полімер може перейти з одного фізичного стану в інший.

Графічна залежність деформації, що розвивається за певний час при заданому напруженні, від температури називається **термомеханічною кривою** (рис.10.2). При температурі нижче $t_{кр}$ полімери є крихкими. Температура t_c відповідає температурі їх силування. Полімери з просторовою структурою перебувають тільки в склоподібному стані.

Дрібно сігчаста структура дозволяє отримувати полімери в склоподібному і високоеластичному станах. Високо еластичний стан характеризується значними зворотними деформаціями. Усі полімери в температурному інтервалі $t_c - t_m$ перебувають у високоеластичному стані.

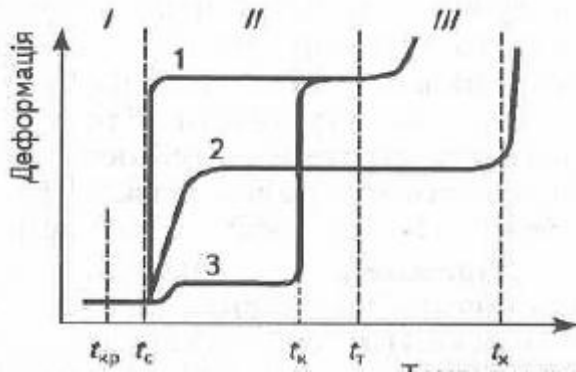


Рисунок 10.2 – Термомеханічні криві некристалічного лінійного (1), кристалічного (2), дрібно-сітчастого (3) полімерів:
 $t_{кр}$, t_c , t_k , t_r , t_x відповідно температури крихкого руйнування, силування, кристалізації, початку в'язкої течії та початку хімічного розкладання.
 Ділянки I – III відповідно склоподібний та в'язкотекучий стан

Старіння полімерів. Під старінням полімерних матеріалів розуміють незворотну зміну найважливіших технічних характеристик, що відбуваються внаслідок складних хімічних і фізичних процесів, які розвиваються в матеріалі при експлуатації і зберіганні. Причинами старіння є світло, тепло, кисень, озон та інші немеханічні чинники. Старіння прискорюється при багаторазових деформаціях. Менш істотно на старіння впливає волога. Розрізняють старіння: теплове; світлове; озонне; атмосферне. Суть процесу старіння полімерів полягає в складній ланцюговій реакції, яка протікає з утворенням вільних радикалів та супроводжується деструкцією (руйнуванням зв'язків між атомами та молекулами) і структуруванням полімеру. Зазвичай старіння є результатом окислення полімеру атмосферним киснем. При структуруванні підвищуються твердість, крихкість, спостерігається втрата еластичності. При температурах 200...500 °C і вище відбувається термічне розкладання органічних полімерів, що супроводжується випаровуванням летючих речовин.

Пластмаси – це штучні матеріали, які виготовляють на основі органічних полімерних речовин. Ці матеріали здатні при нагріванні розм'якшуватися, ставати пластичними. Тоді під тиском їм можна надати задану форму, яка потім зберігається. Залежно від природи зв'язуючої речовини перехід відформованої маси в твердий стан

здійснюється при подальшому її нагріванні або охолодженні. **Зв'язуюча речовина** є обов'язковим компонентом пластмас. Для більшості пластмас – це синтетичні смоли, рідше - ефірцелюлози. Більшість пластмас (термопластичні) складаються з однієї зв'язуючої речовини (наприклад, поліетилен, органічне скло тощо). Важливим компонентом пластмас є **наповнювач** - порошкоподібні, волокнисті та речовини органічного і неорганічного походження. Наповнювачі підвищують механічні властивості, знижують усадку при пресуванні й додають матеріалу відповідних специфічних властивостей (наприклад, фрикційні, антифрикційні). Для підвищення пластичності в напівфабрикат додають **пластифікатори** (органічні речовини з високою температурою кипіння і низькою температурою замерзання), наприклад олеїнову кислоту, стеарин, дибутилфталат тощо. Пластифікатори надають пластмасам еластичність, що полегшує їх обробку. Властивості пластмас залежать від складу окремих компонентів, їх поєднання і кількісного співвідношення, що дає можливість змінювати характеристики пластмас в широких межах.

Залежно від природи зв'язуючої речовини пластмаси поділяють на **термопластичні** (термопласти) – на основі термопластичних полімерів, і **термореактивні** (реактопласти) – на основі термореактивних смол. Термопластичні зручні для переробки у виробі, дають незначну усадку при формуванні (1...3%). матеріал відрізняється великою пружністю і незначною крихкістю. Термореактивні полімери після тверднення і переходу зв'язуючого в термостабільний стан крихкі, часто дають значну усадку (до 10...15%) при переробці до їх складу вводять зміцнюючі наповнювачі.

10.2 Термопластичні пластмаси

Основу цих пластмас складають полімери лінійної або розгалуженої структури, такі як поліетилен. Термопластичні пластмаси застосовують як прозоре органічне скло, високо- і низькочастотні діелектрики, хімічно стійкі матеріали. Деталі, виготовлені з таких матеріалів, експлуатуються в обмеженому інтервалі температур. При нагріванні до температур вище 60...70 °C починається різке зниження фізико-механічних властивостей пластмаси, хоча більш теплостійкі пластмаси можуть

використовуватися при 150...250 °С. Термостійкі полімери з жорсткими ланцюгами і циклічною структурою стійкі до 400...600 °С.

Поліетилен – продукт полімеризації етилену, є хімічно стійким. Недоліком його є схильність до старіння. Для захисту від старіння в поліетилен вводять стабілізатори та інгібітори (2-3% сажі уповільнюють процеси старіння у 30 разів). Поліетилен використовують для виготовлення литих труб і пресованих несилкових деталей (наприклад, вентилі, контейнери), поліетиленових плівок для ізоляції дроту і кабелів, чохлів, скління парників, облицювання водоймищ. Крім того, поліетилен використовують як покриття на металах для захисту від корозії, вологи, електричного струму тощо.

Поліпропілен є похідним етилену. Це жорсткий нетоксичний матеріал з високими фізико-механічними властивостями. У порівнянні з поліетиленом цей пластик більш теплостійкий - зберігає форму до температури 150 °С. Поліпропіленові плівки міцні і більш газонепроникні, ніж поліетиленові, а волокна еластичні, міцні і хімічно стійкі. Недоліком пропілену є невисока морозостійкість (до -10...-20 °С). Поліпропілен використовують для виготовлення труб, конструкцій і деталей автомобілів, мотоциклів, холодильників, корпусів насосів, різних ємностей тощо. Полістирол – твердий, міцний, прозорий, аморфний полімер. За діелектричними характеристиками близький до поліетилену, зручний – твердий, міцний, прозорий, аморфний полімер, зручний для механічної обробки, добре забарвлюється.

Полістирол розчиняється в неполярних розчинниках (наприклад, бензолі), водночас він хімічно стійкий до кислот і лугів; нерозчинний в спиртах, бензині, маслах, воді. Недоліком полістиролу є його невисока теплостійкість, схильність до старіння та утворення тріщин. Ударостійкий полістирол має у 3...5 разів більшу міцність на удар і у 10 разів більше відносне видовження порівняно зі звичайним полістиролом. З полістиролу виготовляють деталі для радіотехніки, деталі машин і механізмів, ємності для води і хімікатів, плівки, труби тощо.

Фторопласт – термічно і хімічно стійкий матеріал. Основним представником полімерів, що містять фтор, є поліфторетилен. Нагрівання до 250 °С не впливає на його механічні властивості, тому використовувати фторопласт можна до цієї температури. Руйнування відбувається при температурі вище 415 °С. Температура силування

становить $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$, але навіть при дуже низьких температурах (до $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$) пластик не окрихчується. Фторопласт стійкий до дії розчинників, кислот, лугів, окислювачів. Це найбільш високоякісний діелектрик і його діелектричні властивості в широкому діапазоні температур майже не змінюються. Фторопласт має дуже низький коефіцієнт тертя ($f=0,04$), який зберігається до температури $327\text{ }^{\circ}\text{C}$. Фторопласт застосовують при виготовленні труб для хімікатів, деталей (вентилі, крани, насоси, мембрани), ущільнюючих прокладок, манжет, сифонів, електрорадіотехнічних деталей, антифрикційних покриттів на металах (підшипники, втулки).

Органічне скло – це прозорий аморфний термопласти на основі складного ефіру акрилової і метакрилової кислот. Матеріал у два рази легший за мінеральне скло ($\rho=1,18\text{ г/см}^3$), відрізняється високою атмосферою стійкістю, оптично прозорий (світлопрозорість 92%), пропускає 75% ультрафіолетових променів (силікатне скло пропускає 0,5%). При $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ органічне скло починає розм'якшуватися, при $105\ldots150\text{ }^{\circ}\text{C}$ з'являється пластичність, що дозволяє формувати з нього різні деталі. Недоліком органічного скла є невисока поверхнева твердість. Органічне скло використовують в літако- і автомобілебудуванні. З органічного скла виготовляють світлотехнічні деталі, оптичні лінзи тощо.

Вініпласт – не пластифікований твердий полівінілхлорид. Вініпласти мають високу механічну міцність і пружність. З нього виготовляють труби для подачі агресивних газів, рідин і води, захисні покриття для електропроводки, деталі вентиляційних установок, теплообмінників, захисні покриття для металевих ємностей, будівельні облицьовувальні плитки. Крім того, вініпластом облицьовують гальванічні ванни. Недоліками цього матеріалу є низька міцність і робоча температура під навантаженням ($60\ldots70\text{ }^{\circ}\text{C}$), великий коефіцієнт лінійного розширення, крихкість при низьких температурах ($t_{кр}=-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_r=90\ldots95\text{ }^{\circ}\text{C}$).

10.3 Термореактивні пластмаси

В цих пластмасах як зв'язуючі речовини застосовують термореактивні смоли, до яких іноді вводять пластифікатори, прискорювачі або уповільнювачі та розчинники. Основними вимогами до зв'язуючих речовин є висока здатність до склеювання (адгезія),

висока теплостійкість, хімічна стійкість і електроізоляційні властивості, простота технологічної переробки, незначна усадка і відсутність токсичності. Для виробництва пластмас широко використовують фенолформальдегідні, кремнійорганічні, епоксидні смоли та різні їх модифікації. Більш високою адгезією до наповнювача володіють епоксидні зв'язуючі речовини, які дозволяють отримувати армовані пластики з високою механічною міцністю. Теплостійкість склопластиків при тривалому нагріванні становить: на кремнійорганічному зв'язу чому від 260 °С до 370 °С, на фенолформальдегідному – до 260 °С, на епоксидному – до 200 °С і на поліамідному зв'язуючому 280...350 °С.

Важливою властивістю епоксидних смол є здатність їх до твердіння не тільки при підвищеній, але й при кімнатній температурах без виділення побічних продуктів з мінімальною усадкою. Це дає змогу виготовляти з них великогабаритні вироби.

Скловолокніти – це матеріали, що складаються зі зв'язуючого – синтетичної смоли і скловолокнистого наповнювача. Скловолокно отримують продавлюванням розплавленої скломаси крізь фільтри (отвори у днищі електропечі). Як наповнювач застосовують суцільне або коротке волокно. Властивості скловолокна залежать також від вмісту в нього лугу. До термостійких відносяться кварцове, кремнеземне, алюмосилікатне ($t_{пл}=1650...1700\text{ }^{\circ}\text{C}$) волокна. Скловолокно не горить, хімічно стійке, а також стійке до дії ультрафіолетових променів. Механічні властивості скловолокна дозволяють пресувати з нього деталі складної форми з металевою арматурою. Матеріал має ізотропні характеристики міцності, набагато вищі, ніж у прес-порошків і волокнітів. Застосовують їх для виготовлення силових електротехнічних деталей, деталей в машинобудуванні, для великогабаритних виробів простої форми (кузови автомашин, човнів, корпуси приладів тощо).

Гетинакс отримують на основі модифікованих фенольних, аніліноформальдегідних, карбамідних смол і різних сортів паперу. За призначенням гетинакс поділяють на електротехнічний (для панелей, щитків) і декоративний, який може мати різні кольори і текстуру (імітує породи дерева). Пластик можна застосовувати при температурі 120...140 °С. Він стійкий до дії хімікатів, розчинників, харчових продуктів; використовується для внутрішнього облицювання

пасажирських салонів літаків, залізничних вагонів, кают суден, у виготовленні меблів.

Текстоліт (зв'язуюче – термореактивні смоли, наповнювач – бавовняні тканини). Серед шаруватих пластиків текстоліт найбільш здатний поглинати вібраційні навантаження, чинити опір розколюванню. Залежно від призначення текстоліти поділяють на конструкційні (ПТК, ПТ, ПТМ), електротехнічні, графітізовані, гнучкі, прокладочні. Текстоліт як конструкційний матеріал застосовується для зубчастих коліс, які працюють безшумно при частоті обертання до 30 000 об/хв.. Довговічність текстолітових вкладишів підшипників у 10...15 разів довша за бронзові. Проте робоча температура текстолітових підшипників невисока (80...90 °С). Вони застосовуються в прокатних станах, відцентрованих насосах, турбінах тощо.

Азботекстоліт містить 38...43% зв'язуючої речовини, решта – азбестова тканина. Азботекстоліт є конструкційним, фрикційним і термоізоляційним матеріалом. Найбільшу теплостійкість має матеріал на кремнійорганічному зв'язуючому (300 °С). З азботекстоліту виготовляють лопатки ротаційних бензонасосів, фрикційні диски, гальмівні колодки (без змащення коефіцієнт тертя $f=0,3...0,38$, з мастилом $f=0,05...0,07$). Азботекстоліт короткочасно витримує високі температури та застосовується як теплозахисний і теплоізоляційний матеріал (протягом 1...4 год. витримує температуру 250...500 °С і короткочасно – біля 3000 °С).

Склотекстоліт на фенол-формальдегідному зв'язуючому недостатньо вібраційно-міцний, але порівняно зі звичайним текстолітом він більш теплостійкий і має кращі електроізоляційні властивості. Склотекстоліти на основі кремнійорганічних смол (СТК, СК-9Ф, СК-9А) мають відносно невисоку механічну міцність, але відрізняються високою тепло- і морозостійкістю, стійкі до окислювачів та інших хімічно активних реагентів, не викликають корозії металів. Епоксидні зв'язуючі (ЕД-8, ЕД-10) забезпечують склотекстолітам високі механічні властивості, що дає змогу виготовляти з них великогабаритні деталі. Склотекстоліти на основі ненасичених поліефірних смол (ПН-1) також не потребують високого тиску при пресуванні і застосовуються для виготовлення великогабаритних деталей. Склопластики можуть працювати тривалий час при 200...400 °С, однак короткочасно – протягом кількох

десять секунд – склопластики витримують кілька тисяч градусів. За дії високих температур поверхневі шари матеріалу вигорають. Теплопровідність пластиків у сотні разів менша за метали, тому за короткочасної дії високої температури внутрішні шари нагріваються до 200...350 °С і зберігають міцність. Склопластики є конструкційним матеріалом, який використовують для силових виробів у різних галузях техніки (несучі деталі літаків, кузови і кабіни автомобілів, автоцистерни, залізничні вагони, корпуси суден). Зі склопластиків виготовляють корпуси машин, кожухи, захисні огорожі, вентиляційні труби, бачки, рукоятки, контейнери.

10.4 Гумові матеріали

Гумою називається продукт хімічного перетворення (вулканізації) суміші каучуку та сірки з різними добавками. При виготовленні гуми та гумових виробів спочатку отримують сиру гуму (суміш усіх цих речовин), після чого проводять вулканізацію при 145...150 °С. При вулканізації змінюється молекулярна структура полімеру (утворюється просторова сітка), що приводить до зміни його фізико-механічних властивостей: різко зростає міцність на розтяг і еластичність каучуку, а пластичність майже повністю зникає (наприклад, натуральний каучук має $\sigma_b=1,0\ldots1,5$ МПа, після вулканізації $\sigma_b=35$ МПа). Крім того, збільшується твердість та опір зношуванню. Гума як технічний матеріал відрізняється від інших матеріалів високою еластичністю, яка властива каучуку – головному вихідному компоненту гуми. Вона здатна до дуже значних деформацій (відносне подовження перевищує 1000%), які майже повністю зворотні. При кімнатній температурі гума перебуває у високо еластичному стані. Її еластичні властивості зберігаються у широкому діапазоні температур. Особливістю гуми як технічного матеріалу є релаксаційний характер деформації. При кімнатній температурі час релаксації може становити 4...10 с і більше. Для гумових виробів характерні висока стійкість до стирання, газо- і водонепроникність, хімічна стійкість, електроізоляційні властивості та незначна питома вага. Сукупність технічних властивостей гумових матеріалів дає змогу застосовувати їх для амортизації та демпфірування, ущільнення і герметизації в умовах повітряних і рідких середовищ, хімічного захисту деталей машин, трубопроводів,

шлангів, для покришок і камер літаків та автотранспорту тощо. Номенклатура гумових виробів налічує понад 40 000 найменувань.

За призначенням у машинобудуванні гумові деталі поділяють на такі групи:

- ущільнювачі;
- вібро- та звукоізолятори;
- протиударні;
- силові (шестерні, корпуси насосів, муфти, шарніри);
- антифрикційні;
- фрикційні деталі та інструменти;
- не силові та захисні;
- декоративні.

10.4.1 Склад і класифікація гум

Основою гуми слугує натуральний (НК) або синтетичний (СК) каучук, який визначає основні властивості гумового матеріалу. Для покращання фізико-механічних властивостей до каучуку додають різні добавки:

- **вулканізуючі речовини (агенти)** – найчастіше застосовують сірку і селен, іноді – переокси для гуми електротехнічного призначення замість елементарної сірки (яка взаємодіє з міддю) застосовують органічні сірчисті сполуки – тіурам;

- **антиоксиданти** – речовини, що сповільнюють процес старіння гуми, який призводить до погіршення її експлуатаційних властивостей. Для цього використовують парафін та віск, що утворюють поверхневі захисні плівки;

- **пластифікатори (розм'якшувачі)** полегшують переробку гумової суміші, збільшують еластичні властивості каучуку, підвищують морозостійкість гуми. Як розм'якшувачі у гуму вводять парафін, вазелін, стеаринову кислоту, бітуми, рослинні олії. Кількість розм'якшувачів становить 10...30% від маси каучуку;

- **наповнювачі** за впливом на каучук поділяють на активні (підсилюючі) та неактивні (інертні). Активні наповнювачі (вуглецева та біла сажа, кремнієва кислота, оксид цинку й інші) підвищують механічні властивості гум: міцність, опір стиранню, твердість. Неактивні наповнювачі (крейда, тальк, барит) вводяться для здешевлення вартості гуми. Часто до складу гумової суміші вводять продукт переробки старих гумових виробів і відходів гумового

виробництва (регенерат). Крім зниження вартості, регенерат підвищує якість гуми, знижуючи її схильність до старіння;

- **барвники** мінеральні або органічні вводять для забарвлення гум. Деякі фарбуючі речовини (білі, жовті, зелені) поглинають короткохвильову частину сонячного спектра і цим захищають гуму від світлового старіння.

Основним компонентом гуми крім каучуку є сірка. Залежно від кількості сірки, що вводиться в гуму, одержують різну частоту сітки полімеру. При введенні 1...5% сірки утворюється рідка сітка і гума виходить високо еластичною, м'якою. Зі збільшенням процентного вмісту сірки сігчаста структура стає все щільнішою, а гума – більш твердою. При максимально можливому (30%) насиченні каучуку сіркою утворюється твердий матеріал, що має назву ебоніт.

10.4.2 Гуми загального призначення

До таких гум відносять вулканізати неполярного каучуку – натуральний каучук (НК), синтетичний каучук бутадієновий (СКБ), бутадієн-стирольний каучук (СКС), синтетичний каучук ізопренів (СКИ).

Натуральний каучук (НК) є полімером ізопрену $(C_5H_8)_n$. Розчиняється він у жирних і ароматичних розчинниках (бензині, бензолі, хлороформі, сірковуглеці тощо), утворюючи в'язкі розчини, що використовують як клеї. При нагріванні вище 80...100 °С каучук стає пластичним і при 200 °С починає розкладатися. При -70 °С НК стає крихким. Для отримання гуми НК вулканізують сіркою. Гуми на основі НК відрізняються високою еластичністю, міцністю, водо- і газонепроникністю, високими електроізоляційними властивостями.

Синтетичний каучук бутадієновий (СКБ) отримують за методом Лебедева. Формула полібутадієну $(C_4H_6)_n$. Це некристалічний каучук, що має низьку межу міцності при розтягуванні. В гуму на його основі необхідно вводити посилюючі наповнювачі (сажу, оксид, цинк та інші). Морозостійкість СКБ невисока (-40...-45 °С). Розбухає він у тих же розчинниках, що і НК.

Бутадієн-стирольний каучук (СКС) отримують при спільній полімеризації бутадієну (C_4H_6) і стиrolу $(CH_2=CH-C_6H_5)$. З такого каучуку отримують гуми з високим опором старінню, які добре працюють в умовах циклічних деформацій. За газонепроникністю і

діелектричними властивостями вони рівноцінні гумам на основі НК. Каучук СКС-10 можна використовувати при температурах $-74...-77^{\circ}\text{C}$.

Синтетичний каучук ізопреновий (СКИ) – це продукт полімеризації ізопрену C_5H_8 . Отримання СКИ стало можливим у зв'язку з використанням нових видів каталізаторів (наприклад, літію). За будовою, хімічним і фізико-механічними властивостями СКИ близький до натурального каучуку.

Гуми загального призначення можуть працювати в середовищі води, повітря, неконцентрованих розчинів кислот і лугів. Інтервал робочих температур становить від $-35...-50$ до $80...130^{\circ}\text{C}$. З таких гум виготовляють шини, паси, шланги, транспортні стрічки, ізоляцію кабелів, різні гумотехнічні вироби.

Як і пластмаси, гуми схильні до процесу **старіння**, яке спостерігається при зберіганні та експлуатації гумових виробів під впливом світла, тепла, кисню та озону. Старіння по-різному позначається на механічних властивостях гум. Температура і тривалість старіння звичайно зумовлюють зниження міцності та підвищення твердості різних гум.

10.4.3 Гуми спеціального призначення

Такі гуми поділяють на: маслобензостійкі, теплостійкі, свіглоозоностійкі, зносостійкі, електротехнічні, стійкі до гідравлічних рідин.

Маслобензостійкі гуми отримують на основі каучуку хлоропренового (на ірит), бутадієн-нітрильного та тіоколу.

Наїрит є хлоропреновим каучуком. Вулканізація може проводитися термообробкою, навіть без сірки, оскільки під дією температури каучук переходить в термостабільний стан. Гуми на основі наїриту мають високу еластичність, вібростійкість, озоностійкість. Вони стійкі до дії палива і мастил, чинять опір тепловому старінню. За термостійкістю і морозостійкістю ($-35...-40^{\circ}\text{C}$) вони поступаються як НК, так і СК.

Бутадієн-нітрильний каучук (СКН) – це продукт спільної полімеризації бутадієну з нітрилом акрилової кислоти. Вулканізують СКН за допомогою сірки. Гуми на основі СКН мають високу міцність ($\sigma_{\text{в}}=0,34$ МПа), спроможні чинити опір стиранню, але за еластичністю поступаються гумам на основі НК, мають високу стійкість щодо старіння та дії розбавлених кислот і лугів.

Маслобензостійкі гуми працюють в середовищі бензину, палива, мастил в інтервалі температур від $-30...-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $100...130\text{ }^{\circ}\text{C}$. Гуми на основі СКН застосовують для виробництва пасів, транспортних стрічок, метало рукавів, маслобензостійких гумових деталей (ущільнюючі прокладки, манжети тощо).

Механічні властивості гуми на основі *тіюколу* невисокі. Еластичність гум зберігається при температурі $-40...-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Теплостійкість не перевищує $60...70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Морозостійкими є гуми на основі каучуку, що мають низькі температури силування. Наприклад, гуми на основі СКС можуть працювати при температурі до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Зносостійкі гуми отримують на основі поліуретанових каучуків СКУ. Такі каучуки мають високу міцність, еластичність, опір стиранню, маслобензостійкість, а його газонепроникність в 10...20 разів вища за НК. Робочі температури гум на його основі становлять від -30 до $130\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Гуми на основі СКУ застосовують для виготовлення автомобільних шин, транспортних стрічок, взуття, для обкладання труб і жолобів, якими транспортуються абразивні матеріали, тощо.

ЛІТЕРАТУРА

1. Атаманюк В.В. Технологія конструкційних матеріалів. — Київ: Кондор, 2006.- 528 с.
2. Хільчевський В.В., Кондратюк С.Є., Степаненко В.О., Лопатько К.Г. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів. — Київ: «Либідь», 2002.-326 с.
3. Гуляев А.П. Металловедение. — М.: Металлургия, 1986. — 368 с.
4. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. — М.: Машиностроение, 1980. — 511с.
5. Мозберг Р.К. Материаловедение: Учеб. пособие. — 2-е изд., перераб. — М.: Высш. шк., 1991. — 448 с.
6. Материаловедение /Под ред. Б.Н. Арзамасова. —М.: Машиностроение, 1986. — 384 с.
7. Соломахо, В.Л. Справочник конструктора-приборостроителя. Проектирование. Основные нормы / В.Л. Соломахо [и др.]. — Минск : Выш. школа, 1983. — 272 с.