

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Український державний морський технічний університет
імені адмірала Макарова

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт з дисципліни

**"Матеріалознавство і термічна обробка металів та зварних
з'єднань"**

Рекомендовано Методичною радою УДМТУ

Миколаїв 2003

Дубовий О.М., Лебедева Н.Ю. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни "Матеріалознавство і термічна обробка металів та зварних з'єднань". – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – 68 с.

Кафедра матеріалознавства і технології металів

Подано загальні теоретичні відомості та рекомендації щодо виконання лабораторних робіт, які пов'язані з дослідженням структури та властивостей чавунів, особливостей мікроструктури зварних з'єднань та впливу термічної обробки на їх мікроструктуру і механічні властивості, прогартуваності і загартованості сталей, впливу хіміко-термічної обробки на структуру і властивості поверхневого шару сталених виробів, структури кольорових сплавів, а також дослідження властивостей матеріалів на основі полімерів.

Призначено для студентів спеціальностей 8.092301 "Технологія та устаткування зварювання", 8.090103 "Композиційні та порошкові матеріали, покриття" та інших інженерних спеціальностей.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Ю.М. Лебедев

© Український державний
морський технічний
університет, 2003

© Видавництво УДМТУ, 2003

Лабораторна робота № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ЧАВУНІВ

Мета роботи: дослідити структуру білих, сірих, ковких, половинчастих, високоміцних чавунів; установити зв'язок між їх складом, умовами одержання, структурою та властивостями.

Загальні відомості

Чавун – це сплав заліза з вуглецем, кількість якого перевищує 2,14 %. Чавун має більш низькі механічні властивості, ніж сталь, але його економічна доцільність і добрі технологічні властивості (ливарні, антифракційні, здатність мати різну будову в залежності від складу й умов кристалізації, добра оброблюваність різанням, висока зносостійкість) роблять чавун придатним для відливання різних деталей.

Класифікація чавунів

У залежності від того, в якому стані знаходиться вуглець, чавуни поділяються на дві групи: чавуни, в яких весь вуглець знаходиться у зв'язаному стані у вигляді цементиту або інших карбідів; чавуни, в яких весь вуглець або його частина знаходяться у вільному стані у вигляді графіту.

До першої групи належать білі чавуни. Злам такого чавуну білий, блискучий. Білі чавуни дуже крихкі та тверді, важко піддаються механічній обробці ріжучим інструментом. Чисто-білі чавуни в машинобудівництві використовуються рідко, вони зазвичай йдуть на переробку на сталь або використовуються для одержання ковкого чавуну.

За структурою білі чавуни бувають таких видів:

доевтектичні, які містять від 2,14 до 4,3 % вуглецю. Їх структура складається з перліту, вторинного цементиту та ледебури-ту (рис. 1.1,*а*);

евтектичні, які містять 4,3 % вуглецю. Їх структура складається з ледебури-ту (рис. 1.1,*б*);

заевтектичні, які містять від 4,3 до 6,67 % вуглецю. Їх структура складається з первинного цементиту і ледебури-ту (рис. 1.1,*в,г*).

Отже, структура цих чавунів відрізняється від структури сталі наявністю ледебури-ту або ледебури-ту і первинного цементиту.

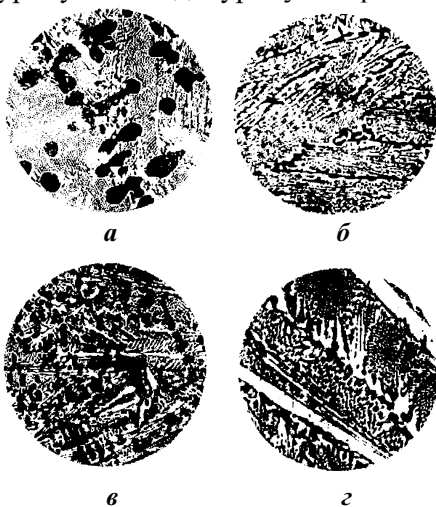


Рис. 1.1. Структури доевтектичного (*а*), евтектичного (*б*) та заевтектичного (*в, г*) білого чавуну

До другої групи відносяться сірі, ковкі та високоміцні чавуни. Злам цих чавунів сірий, матовий. Структура складається з металевої основи і графітних включень (рис. 1.2), за формою яких і розрізняють чавуни другої групи. У сірих чавунах графіт виділяється у вигляді пластин, у ковких – у вигляді пластівців, у високоміцних – у вигляді куль (рис. 1.3).

За металевою основою чавуни другої групи поділяються на *феритні* (кількість зв'язаного вуглецю менше 0,01 %); *ферито-перлітні* (кількість зв'язаного вуглецю від 0,01 до 0,8 %) і *перлітні* (кількість зв'язаного вуглецю 0,8 %).

Отже, структура цих чавунів відрізняється від структури сталі тільки наявністю графіту. Одержання вуглецю у вільному або

зв'язаному стані залежить від процесів графітизації, тобто умов утворення графіту.

Одержання, властивості та маркування сірих, ковких і високоміцних чавунів

Оскільки структура цих чавунів складається з металевої основи і графітних включень, то і властивості чавунів залежатимуть від властивостей металевої основи і від кількості, форми та характеру розподілу графітних включень.

Металева основа	Форма графітних включень		
	пластинчаста	пластівчаста	куляста
Ферит			
Ферит + перліт			
Перліт			

Рис. 1.2. Класифікація чавуну за металевою основою і формою графітних включень (схеми структур)

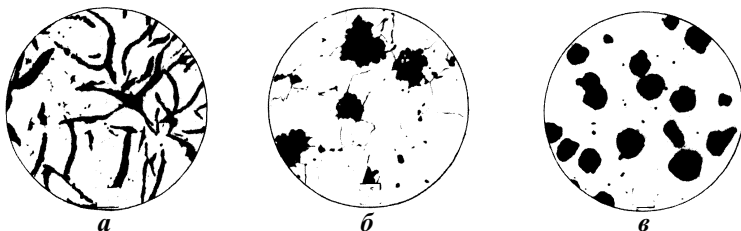


Рис. 1.3. Різні форми графіту в чавуні:

а – пластинчастий (сірий чавун); *б* – пластівчастий (ковкий чавун);
в – кулястий (високоміцний чавун)

Властивості металевої основи, як і сталевій, залежать від її структури. Зі збільшенням кількості перліту твердість і міцність на розрив збільшуються, а пластичність зменшується. Графіт має низькі механічні властивості, тому включення графіту в чавуні

можна розглядати в першому наближенні як порожноти, які порушують цілісність металевої основи. Такі властивості чавуну, як твердість і границя міцності при стиску, головним чином залежать від складу металевої основи. А такі властивості, як границя міцності на розрив, вигин, кручення, а також пластичність, залежать від кількості, розмірів та форми графітних включень, і чим грубіше включення, тим гірші механічні властивості чавуну. Особливо низькі властивості мають чавуни, в яких графітні включення утворюють замкнений скелет. В міру округлення включень властивості чавуну поліпшуються, наближаючись до властивостей сталі.

Сірі чавуни одержують повільним охолодженням залізовуглецевих сплавів з місткістю вуглецю більше 2,14 %. Структури сірих чавунів показані на рис. 1.4.



Рис. 1.4. Структури сірого чавуну з феритною (а), ферито-перлітною (б), перлітною (в) основами; $\times 200$

Якщо кількість зв'язаного вуглецю становить більше 1 %, то такий чавун називається половинчастим. Його структура складається з ледебуриту, перліту та графіту. Сірі чавуни маркуються двома буквами СЧ, дві цифри після букв вказують на середнє, зменшене в 10 разів, значення границі міцності при розтягуванні, МПа, наприклад: СЧ15 – сірий чавун, має границю міцності при розтягуванні $\sigma_b = 150$ МПа.

Високоміцні чавуни одержують шляхом подвійного модифікування: додаванням у рідкий чавун перед розливкою магнію в кількості 0,03...0,07 % від ваги чавуну і фероцерію. Магній сприяє одержанню графіту у формі куль, крім того, підвищує міцність металевої основи, здрібнюючи будову ферито-цементитної суміші (рис. 1.5).

Маркуються високоміцні чавуни за ДСТУ 3925-99. Умовне

позначення марки чавуну з кулястим графітом містить букви ВЧ і цифрове позначення мінімального тимчасового опору під час розтягування, МПа, та через дефіс – мінімального відносного подовження, %, наприклад: ВЧ600-3 – високоміцний чавун, границя міцності при розтягуванні $\sigma_B = 600$ МПа, відносне подовження $\delta = 3$ %.

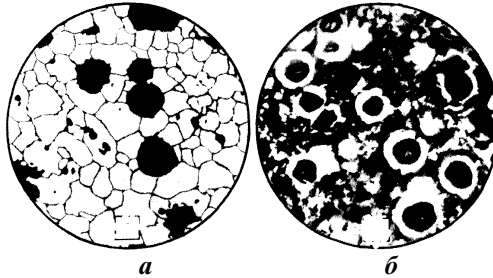


Рис. 1.5. Мікроструктура високоміцних чавунів на феритній (а) і ферито-перлітній (б) основах; x200

Ковкі чавуни одержують шляхом спеціалізованого відпалу білих доєвтектичних чавунів з кількістю вуглецю 2,2...3,2 %. Графік відпалу показаний на рис. 1.6. Відливки з маловуглецевого білого чавуну повільно нагрівають протягом 20...25 год у нейтральному середовищі до температури 950...1000 °С і при цій температурі тривало (10...15 год) витримують (перша стадія графітизації). Потім повільно охолоджують до температури, трохи нижчої за температуру евтектоїдного перетворення (700...740 °С – у залежності від складу чавуну) і тривалий час витримують при цій температурі (друга стадія графітизації). Подальше охолодження проводять на повітрі.

На першій стадії цементит $t, ^\circ\text{C}$ ледебуриту і вторинний цементит розпадаються з утворенням аустеніту та пластівчастого графіту за реакцією



цементит $\rightarrow$ аустеніт + графіт.

Швидкість охолодження від першої до другої стадії графітизації повинна забезпечувати ви-

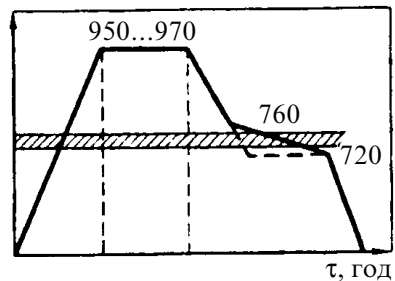


Рис. 1.6. Схема відпалу білого чавуну на ковкий

ділення вторинного цементиту з аустеніту і його розпад на аустеніт і графіт.

На другій стадії цементит перліту розпадається на ферит та графіт за реакцією



цементит $\rightarrow$ ферит + графіт.

Структура після кінцевої обробки буде складатися з фериту та пластівчастого графіту (рис. 1.7,*а*). Тривалість всієї термічної обробки – 70...80 год. Якщо на другій стадії витримка недостатня, то одержать ферито-перлітний ковкий чавун (рис. 1.7,*б*); якщо витримки не буде зовсім – одержать перлітний ковкий чавун.

Ковкі чавуни маркуються буквами КЧ і цифровими позначеннями. Перші дві цифри вказують на зменшене в 10 разів значення границі міцності при розтягуванні, МПа, цифра через дефіс – на мінімальне значення відносного подовження, %, наприклад: КЧ45-5 – ковкий чавун, границя міцності при розтягуванні $\sigma_{\text{в}} = 450$ МПа, відносне подовження $\delta = 5$ %.

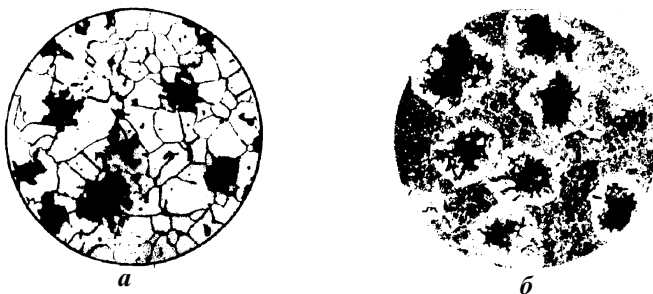


Рис. 1.7. Мікроструктура ковких чавунів на феритній (*а*) і ферито-перлітній (*б*) основах; $\times 200$

Матеріали, зразки та прилади: мікроскоп МІМ-7, набір шліфів різних чавунів.

Порядок виконання роботи

1. Дослідити під мікроскопом та описати мікроструктуру заданих зразків чавуну.
2. Схематично зобразити кожену структуру.

Порядок оформлення звіту

1. Коротко сформулювати мету роботи.
2. Навести дані про класифікацію, структуру, властивості, методи одержання і маркування різних чавунів.
3. Представити схеми мікроструктур.
4. Пояснити (письмово) вплив форми графіту на властивості чавуну.

Контрольні запитання

1. Що називається чавуном?
2. Як класифікуються чавуни?
3. Яку структуру мають білі чавуни?
4. Яку структуру мають сірі, ковкі, високоміцні та половинчасті чавуни?
5. Як впливає форма графіту на властивості чавунів?
6. Які властивості чавунів залежать від будови металевої основи, а які – від включень графіту?
7. Як одержують і маркують сірі, ковкі високоміцні чавуни?

Лабораторна робота № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСТРУКТУРИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

Мета роботи: дослідити особливості мікроструктури зварних з'єднань маловуглецевих і низьколегованих сталей.

Загальні положення

Зварюванням називається технологічний процес отримання нерознімних з'єднань за рахунок сил міжатомних зв'язків.

Для зближення кромek, що зварюються, по всій довжині поверхні на відстані декількох ангстремів ($\text{\AA} = 10^{-10} \text{ м}$) дуже широко використовують розплавлення металу в місці зварювання. Оскільки атоми рідини мають велику рухливість, вони зближаються з атомами твердого металу, а подальша кристалізація забезпечує отримання монолітного з'єднання.

Обсяг металу, що зазнав кристалізації при зварюванні, називається *металом шва*. Склад металу шва може збігатися зі складом виробу, який зварюється, або ж істотно відрізнятися від нього. Це залежить від виду зварювання, марки сталі і вимог до звар-

ного з'єднання. Якість зварного з'єднання багато в чому залежить від структури шва і пов'язаної з ним зони термічного впливу (ЗТВ), яка прилягає до нього. Структурні зміни в цій зоні викликані впливом на метал термічного циклу зварювання.

Якщо зварне з'єднання виконане за один прохід, то метал шва має стовпчасту спрямованість кристалів і дендритоподібну будову. Механічні властивості металу шва залежать від його складу та швидкості охолодження. Прискорене охолодження, завдяки збільшенню перлітної складової і більш тонкої будови перліту, призводить до зростання характеристик міцності металу і зменшення його пластичності.

Іноді при перегріванні металу спостерігається поява у шві так званої відманштеттової структури. У цьому випадку ферит виділяється не на границях зерен, а по їхніх кристалографічних площинах (куба, октаедра та ін.) у вигляді різноманітних смужок, які паралельні одна одній або утворюють між собою визначені кути. Така структура має гірші механічні властивості, зокрема низьку ударну в'язкість.

Структура литого металу з грубою стовпчастою будовою характерна для однопрохідних швів. Виконання швів у декілька проходів істотно впливає на структуру і властивості металу в цілому. Пояснюється це тим, що накладення кожного наступного валика рівнозначне повторному тепловому впливу на валик, що лежить нижче, і під впливом такої своєрідної термічної обробки структура цих шарів значно поліпшується: стає дрібнозернистою, груба стовпчаста структура зникає. Верхній валик зберігає литу структуру металу, проте його властивості дещо поліпшуються. На рис. 2.1 показана схема зміни структури металу шва при дво-прохідному зварюванні. Як видно зі схеми, верхній шар 2 зберіг стовпчасті кристали, а нижній 1 – дрібнозернисту будову.

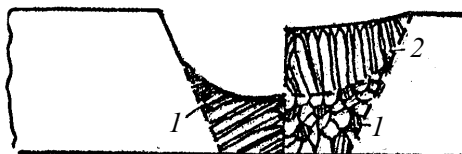


Рис. 2.1. Схема зміни структури шва при накладенні наступного валика металу

Мікроструктура основного металу і зона термічного впливу

При відомій максимальній температурі нагрівання окремих точок зони термічного впливу і швидкості їх охолодження, користуючись діаграмою залізо–вуглець, можна

визначити можливі зміни структури на окремих ділянках зони термічного впливу і навіть приблизні лінійні розміри цих ділянок.

Максимальні температури нагрівання окремих точок зони термічного впливу можна визначити як експериментально, так і теоретично, на основі теорії поширення тепла при зварюванні, якщо правильно обрати схему процесу. На рис. 2.2 схематично зображений однопрохідний зварний шов маловуглецевої сталі, а над ним, у тому ж масштабі за довжиною, проведена крива розподілу максимальних температур для окремих точок зони термічного впливу. Нижче подана схема мікроструктури окремих ділянок основного металу. Поруч, у тому ж температурному масштабі, побудована ліва частина діаграми стану залізо–цементит, де вертикальною прямою 1–1 показаний склад зварюваного металу за вуглецем. Якщо позначити на даній прямій температурні границі окремих ділянок зони термічного впливу, які мають приблизно однакову структуру, то можна перенести ці точки на криву розподілу максимальних температур і потім знести їх униз, тобто на зварні з'єднання. У такий спосіб установлюються приблизні лінійні розміри окремих ділянок зони термічного впливу.

Зона термічного впливу складається з таких характерних ділянок (див. рис. 2.2): 1 – неповного розплавлення; 2 – перегріву; 3 – нормалізації дрібних зерен; 4 – неповної перекристалізації; 5 – відпуску.

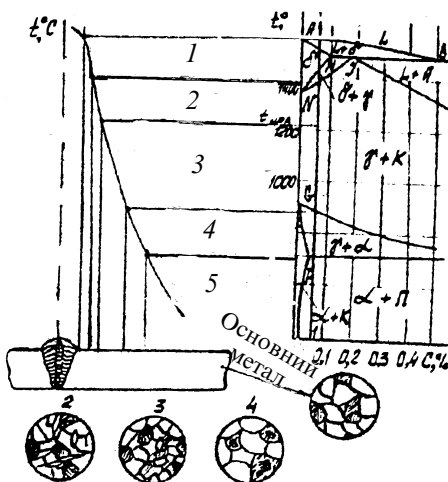


Рис. 2.2. Будова зварного з'єднання маловуглецевої сталі

Протяжність ділянок зростає зі зменшенням градієнта розподілу максимальних температур нагрівання. Залежить вона і від вмісту хімічних елементів у сталі і, насамперед, від кількості вуглецю.

Ділянка 1, що прилягає до лінії сплавлення, утвориться в такому вигляді у зварних з'єднаннях сталей, які зазнають перитектичного перетворення, що властиво для сталей з вмістом вуглецю до 0,51 %. Характерним для нього є утворення високотемпературної хімічної мікронеоднородності, наслідком якої може бути істотне зниження технологічних і службових властивостей зварних з'єднань.

У загальному випадку в зоні сплавлення, як і в металі шва, виникають границі двох типів: первинні і вторинні. Вважається, що первинні границі утворюються в ЗТВ біля лінії сплавлення внаслідок утворення і кристалізації рідкої фази. Середній рівень ліквідації на первинних границях досягає 140...150 % Si, 125...130 % Cr, 140 % Mo, 150 % C.

У процесі високотемпературного нагрівання підплавляються окремі ділянки структури, у першу чергу границі зерен аустеніту, ділянки сегрегації легуючих елементів, неметалевих включень, зокрема сульфідів. При охолодженні розплавлені ділянки ЗТВ кристалізуються, утворюючи первинні границі. При подальшому охолодженні виникають вторинні границі.

Чинником, що сприяє утворенню високотемпературної хімічної мікронеоднорідності, є процес $\gamma \rightarrow \delta$ -перетворення при нагріванні до температури 1400 °C, якому передують підплавлення границь аустенітних зерен і сегрегація у підплавлених ділянках домішок, у першу чергу вуглецю. Цьому ж сприяє різна розчинність окремих хімічних елементів у γ - і δ -Fe. Розчинність сірки у цих модифікаціях дорівнює відповідно 0,09 і приблизно 0,24 %.

Підвищенням інтенсивності охолодження зварних з'єднань після високотемпературного $\gamma \rightarrow \delta$ -перетворення можна істотно зменшити розмір зерна аустеніту в результаті поліморфного $\delta \rightarrow \gamma$ -перетворення при зварюванні низьковуглецевих і низьколегованих сталей, що кристалізуються з розплаву з утворенням δ -фериту.

Ділянка 2 набуває крупнозернистої структури внаслідок перегрівання аустенітних зерен, особливо при зварюванні з термічними циклами, які характеризуються зниженою інтенсивністю нагрівання. У низьковуглецевих і низьколегованих сталях при

уповільненому наступному охолодженні утвориться ферито-перлітова структура відманштеттового типу з низькими механічними властивостями. Максимальні температури нагрівання металу на цій ділянці перевищують $t_{\text{ІРА}}$ – температуру початку інтенсивного росту зерна аустеніту.

Ділянка 3 – ділянка нормалізації з температурою нагрівання в інтервалі $t_{\text{ІРА}} \dots A_{c_3}$. Для неї характерна відносно дрібнозерниста структура аустеніту з підвищеною неоднорідністю за вуглецем і, особливо, за легуючими елементами.

Ділянка 4 – ділянка неповної перекристалізації з максимальною температурою нагрівання в інтервалі $A_{c_3} \dots A_{c_1}$. Структура сталі – аустеніто-феритна з наявністю карбідів. Аустеніт характеризується найбільшою хімічною неоднорідністю за вуглецем й елементами заміщення. Ряд дослідників відзначають наявність збагачення Mn периферійних ділянок нових аустенітних зерен. Утворення таких збагачених зон знижує термодинамічну активність вуглецю в аустеніті при зберіганні відносно низьковуглецевої серцевини. Ця обставина важлива в практичному плані. При помірних швидкостях охолодження з міжкритичних температур більш вуглецева частина γ -фази перетворюється за мартенситним механізмом, а менш вуглецева – за дифузійним.

Ділянка 5 – ділянка відпуску, у якій метал нагрівається до температури $A_{c_1} \dots 600$ °С, де найбільш активно здійснюються процеси диференціації фериту та цементиту, коагулюють карбіди. На цій ділянці при зварюванні металу, що зазнає холодної механічної обробки тиском, протікає рекристалізація зерен фериту, тобто ріст цих зерен із роздрібнених частин, які утворились при пластичній деформації. Такий ріст можливий за рахунок переходу атомів заліза із одного зерна в сусіднє, що має меншу величину вільної енергії.

У ЗТВ зварних з'єднань утворюються й інші ділянки з $t_{\text{max}} < 600$ °С. При таких температурах у сталях можуть розвиватися процеси відпускнуї крихкості і дисперсного зміцнення. Слід зазначити, що на всіх ділянках ЗТВ процеси структурно-фазових перетворень, а отже, і механічні властивості зварних з'єднань у значній мірі залежать від параметрів термічних циклів зварювання і термообробки, хімічного складу і вихідного структурного стану сталей.

Механічні властивості металу зі структурою ділянок дрібно-

го зерна і неповної перекристалізації майже завжди кращі, ніж властивості основного металу.

Виконання швів у декілька проходів впливає на структуру і властивості ЗТВ. Повторний тепловий вплив, подібно до термообробки, призводить до зникнення структури відманштеттового типу на ділянці перегрівання, що покращує механічні властивості зварних з'єднань у цілому.

Матеріали та прилади: оптичний металографічний мікроскоп МІМ-7, об'єктмікрометр і окулярмікрометр, мікрошліфи однопрохідного і двопротідного зварних з'єднань, плакат "Структура зварного з'єднання маловуглецевої сталі".

Порядок виконання роботи

1. Одержати два мікрошліфи одно- і двопротідного зварних з'єднань шва.

2. Установити відповідне збільшення мікроскопа так, щоб можна було легко розрізнити структуру ділянок ЗТВ.

3. Визначити за допомогою об'єктмікрометра ціну поділу шкали окулярмікрометра.

4. За мікрошліфом однопротідного зварювання зробити виміри протяжності ділянок перегрівання, дрібного зерна і неповної перекристалізації.

5. Накреслити схеми мікроструктури металу шва, ділянок зони термічного впливу й основного металу.

6. Зробити огляд мікроструктури багатопрохідного шва і відзначити, як впливають термічні цикли від наплавлення наступних валиків на мікроструктуру близьких ділянок металу шва і ділянок перегріву попередніх проходів. Накреслити схему мікроструктури металу шва, який зазнав і не зазнав впливу повторного термічного циклу.

Порядок оформлення звіту

1. Коротко сформулювати мету роботи.

2. Навести дані про особливості мікроструктури зварних швів маловуглецевих і низьколегованих сталей із використанням діаграми Fe-Fe₃C.

3. Указати розміри протяжності ділянок ЗТВ, накреслити схеми відповідних мікроструктур.

Контрольні запитання

1. Чим відрізняються термічні цикли на ділянках ЗТВ, що знаходяться на різному віддаленні від лінії сплавлення?
2. Чим викликана дендритна ліквіація у металі шва?
3. Які особливості кінетики розпаду аустеніту металу шва і ЗТВ зварних з'єднань?
4. Як впливає швидкість нагрівання на структурні перетворення?
5. Назвіть ділянки ЗТВ зварних з'єднань та особливості їх утворення.
6. Які механічні властивості має метал зі структурою окремих ділянок ЗТВ?
7. Як впливає термічний цикл при наплавленні наступних валиків на структуру сусідніх ділянок металу шва і ділянок ЗТВ?

Лабораторна робота № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАГАРТОВУВАНOSTІ ТА ПРОГАРТОВУВАНOSTІ ВУГЛЕЦЕВИХ І ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

Мета роботи: дослідити вплив температури нагрівання та швидкості охолодження на властивості сталей У8, ШХ15, Х12Ф; зіставити загартовуваність сталей 35, 45, У8; визначити прогартовуваність сталей У10 та ШХ15.

Загальні положення

Термічною обробкою прийнято називати технологічні процеси, що складаються з нагрівання та охолодження металевих виробів і напівфабрикатів з метою зміни їх структури та властивостей.

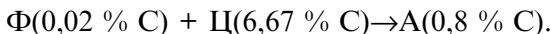
Гартування – вид термічної обробки, що приводить до утворення в сталях нерівноважної структури. Для цього сталі нагрівають до температури, вищої за температуру фазових перетворень, після чого швидко охолоджують. На структуру та властивості сталей впливають перетворення при нагріванні до аустенітного стану, а також подальший розпад аустеніту при різних ступенях переохолодження.

Перетворення в сталях при нагріванні

У залежності від умов нагрівання одержують зерно аустеніту

різного розміру, що значною мірою впливає на властивості продуктів його перетворення. Продукти перетворення дрібнозернистого аустеніту мають більш високу міцність, пластичність, твердість, в'язкість у порівнянні з продуктами перетворення крупнозернистого аустеніту.

При нагріві сталі вище 727 °С (A_1) перліт перетворюється на аустеніт дифузійним шляхом зі зміною концентрації вуглецю у фазах:



Кристали аустеніту зароджуються найчастіше на міжфазних границях "ферит–цементит". Перетворення складаються з двох одночасно протікаючих процесів: поліморфного $\alpha \rightarrow \gamma$ -переходу та розчинення кристалів цементиту Fe_3C . Оскільки в кожній перлітній колонії зароджується декілька центрів кристалізації аустеніту, перетворення призводить до того, що в границях перлітного зерна виростає декілька зерен аустеніту, тобто утворюється більш дрібнозерниста структура.

Під час тривалої витримки після завершення аустенізації або при підвищенні температури нагрівання розпочинається процес збиральної рекристалізації аустеніту, тобто ріст його зерна. Швидкість росту аустенітних зерен при цьому у різних сталей неоднакова і в значній мірі залежить від наявності карбідоутворюючих елементів та способу розкиснення при плавці. В легованих сталях титан, ванадій, цирконій, ніобій, вольфрам, молібден утворюють на границях зерен аустеніту стійкі при температурах аустенізації карбіди, що стримують ріст зерен. З аналогічної причини сталі, розкиснені алюмінієм, являються успадковано дрібнозернистими (оксиди алюмінію – бар'єри на шляху міграції границь зерен), на відміну від успадковано крупнозернистих сталей, розкиснених лише феросиліцієм або феромарганцем.

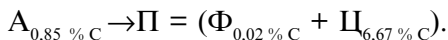
Сталі, що мають грубу крупнозернисту структуру внаслідок високотемпературного нагрівання, називають перегрітими. Перегрів (так звану відманштеттову структуру), на відміну від перепалу (окиснення на границях зерен при досить високій температурі), можна виправити повторною аустенізацією з нагріванням до більш низьких температур.

Перетворення аустеніту при різних ступенях переохолодження

Якщо сталь з температури аустенізації охолоджувати до тем-

ператури нижче 727 °С (A_1), аустеніт буде знаходитись у метастабільному стані, що викликає необхідність його перетворення. Механізм і кінетика такого перетворення зумовлені ступенем переохолодження. Вплив ступеня переохолодження на стійкість переохолодженого аустеніту та швидкість його перетворення зображується графічно у вигляді діаграми (С-діаграми) ізотермічного перетворення. Перетворення аустеніту в інтервалі 727...550 °С для сталі У8 називають перлітним, в інтервалі 550...240 °С – бейнітним (проміжним), а в інтервалі 240...50 °С – мартенситним.

Перлітне перетворення відбувається дифузійним шляхом:



У результаті цього утворюються пластинчасті структури перлітного типу, дисперсність яких оцінюється міжпластинчастою відстанню Δl – середньою сумарною товщиною суміжних пластинок фериту і цементиту – і залежить від ступеня переохолодження. Так, наприклад, якщо перетворення проходить при температурі, вище 650 °С, то утворюється груба суміш кристалів фериту та цементиту ($\Delta l = (5...7) \cdot 10^{-7} \text{ м}$), яку називають перлітом.

Перетворення при 640...590 °С дає більш тонку структуру – сорбіт ($\Delta l = (3...4) \cdot 10^{-7} \text{ м}$), а в інтервалі 580...550 °С – найбільш дисперсну ферито-цементитну суміш – троостит ($\Delta l = (1...2) \cdot 10^{-7} \text{ м}$).

Дисперсність продуктів перетворення зумовлює їх твердість (і міцність): у перліту HRC = 10...20, сорбіту – 20...30, трооститу – 30...40.

Введення в сталь легуючих елементів змінює стійкість переохолодженого аустеніту та швидкість перетворення в перлітній і проміжній областях внаслідок гальмування дифузійних процесів. Всі легуючі елементи, крім кобальту, підвищують стійкість та зменшують швидкість цього перетворення. Криві початку та кінця перетворення зміщуються вправо зі збільшенням часу ізотермічної витримки, а карбідоутворюючі елементи, крім того, змінюють і форму С-кривих.

Мартенситне перетворення проходить при безперервному охолодженні в інтервалі температур M_n (початок перетворення)... M_k (кінець перетворення). Ізотермічна витримка в цьому температурному інтервалі призводить до стабілізації аустеніту, тобто перетворення в цьому випадку не завершується, а в структурі спостерігається залишковий аустеніт. Аустеніт зберігається та-

кож у структурі сталей, що містять від 0,6 % С, якщо охолодження доводиться лише до кімнатної температури, тому що збільшення концентрації вуглецю та більшості легуючих елементів (крім кобальту, алюмінію, кремнію) зменшують температуру початку (M_p) та кінця (M_k) мартенситного перетворення.

Мартенситне $\alpha \rightarrow \gamma$ -перетворення здійснюється бездифузійним шляхом, при якому атоми переміщуються на відстань меншу, ніж міжатомна. Кристали мартенситу когерентно зв'язані з кристалами первинного аустеніту. У зв'язку з бездифузійним характером перетворення ($A_{0,8\%C} \rightarrow M_{0,8\%C}$) весь вуглець залишається у твердому розчині, деформуючи при цьому кристалічну ґратку Fe_2 , внаслідок чого мартенсит має тетрагональну просторову ґратку.

Таким чином, мартенсит (нерівноважна фаза) – пересичений твердий розчин проникнення атомів вуглецю у Fe_α . Чим більше вуглецю в мартенситі, тим вищий ступінь тетрагональності, тим вища твердість сталі при меншій пластичності (при вмісті в сталі 0,6...0,8 % С твердість мартенситу досягає 60 і більше HRC).

Для визначення швидкості охолодження, яка забезпечує одержання необхідної структури, на практиці використовують експериментально побудовані термкінетичні діаграми перетворення аустеніту при безперервному охолодженні. Ці діаграми дозволяють визначити критичну швидкість охолодження $V_{кр}$ – мінімальну швидкість, при якій аустеніт перетворюється на мартенсит без розпаду на ферито-цементитну суміш. При охолодженні зі швидкістю, меншою ніж $V_{кр}$, одержують структури перлітного типу. У табл. 3.1 наведені зразки структур, отриманих після охолодження з різними швидкостями.

Критична швидкість охолодження – важлива технологічна характеристика.

Таблиця 3.1. Режими термічної обробки

Швидкість охолодження, °C/c	Охолодне середовище	Структура	Твердість, HRC
0,5	З піччю	Перліт	10...20
5,0	Повітря	Сорбіт	20...30
50,0	Масло	Троостит	30...40
100,0	Гаряча вода	Троостомартенсит	50...55
200,0	Холодна солоня вода	Мартенсит із залишковим аустенітом	60...65

рактеристика. Вона залежить від хімічного складу сталі. Легуючі елементи (за винятком кобальту) підвищують стійкість переохолодженого аустеніту, зміщують вправо лінії ізотермічної та термодинамічної діаграм, внаслідок чого зменшується $V_{кр}$. Карбіди, нітриди та інші фази в сталях, на утворення яких витрачаються легуючі елементи, збільшують $V_{кр}$. Критична швидкість дещо зменшується зі збільшенням гомогенності аустеніту та розміру його зерен.

Бейнітне (проміжне) перетворення протікає в інтервалі температур між перлітним і мартенситним перетворюваннями аустеніту. Бейніт являє собою двофазну суміш фериту та цементиту, в якій ферит дещо пересичений вуглецем. Головна особливість перетворення – поліморфний $\gamma \rightarrow \alpha$ -перехід протікає за мартенситним механізмом. У сталі У8 бейніт можна одержати ізотермічним гартуванням, а в легованих сталях – і при безперервному охолодженні.

Загартовуваність і прогартовуваність сталей

Загартовуваність – здатність сталі підвищувати твердість внаслідок гартування. Загартовуваність залежить головним чином від вмісту вуглецю в сталі.

Прогартовуваність – здатність сталі гартуватися на визначену глибину. Прогартовуваність вимірюється відстанню від поверхні до напівмартенситної зони, що складається з 50 % мартенситу. Положення напівмартенситної зони визначають виміром твердості. Всі фактори, що збільшують стійкість переохолодженого аустеніту та зменшують $V_{кр}$, покращують прогартовуваність.

Кількісна характеристика прогартовуваності – критичний діаметр $D_{кр}$ циліндричного прутка, який наскрізь прогартується в охолоджувачі. Для забезпечення наскрізного прогартування деталі необхідно, щоб її діаметр був меншим або дорівнював критичному діаметру циліндричного прутка ($D \rightarrow D_{кр}$).

Найменш трудомістким методом визначення прогартовуваності є торцеве гартування (ГОСТ 5657–69), що дозволяє на одному зразку визначити прогартовуваність у будь-якому охолоджувачі.

Глибиною прогартовуваності вважають відстань від поверхні до зони з напівмартенситною структурою (50 % мартенситу та 50 % трооститу). Прогартовуваність визначають не за мікроструктурою, а за зміною твердості. Твердість вуглецевої сталі з напівмартенситною структурою залежить від вмісту вуглецю, а саме підвищується зі збільшенням його вмісту (рис. 3.1).

Стійкість переохолодженого аустеніту підвищують легуючі елементи (крім кобальту). Таким чином, леговані сталі прогартовуються на більшу глибину. Легуючі елементи, особливо молебен і барій, знижують критичну швидкість охолодження, чим сприяють зменшенню внутрішньої напруги і зростанню зерна, які можуть викликати жолоблення або утворення тріщин при нагріванні.

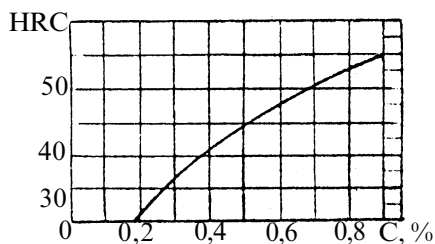


Рис. 3.1. Графік залежності твердості напівмартенситної структури від вмісту вуглецю

Однак існують фактори, які знижують стійкість переохолодженого аустеніту. Це нерозчинені частинки і неоднорідність аустеніту.

Для кількісної оцінки прогартовуваності використовують дійсний або реальний критичний діаметр, тобто найбільший діаметр зразка, при якому сталь у даному охолодному середовищі прогартовується повністю з напівмартенситною зоною у центрі зразка.

Оскільки критичний діаметр залежить від охолодної спроможності середовища, то він характеризує прогартовуваність сталі тільки в даних умовах. Тому, щоб прогартовуваність не ставити у залежність від середовища охолодження, введено теоретичне поняття ідеального критичного діаметра.

Ідеальний критичний діаметр – діаметр зразка, у центрі якого при гартуванні в ідеально охолодному середовищі утворюється напівмартенситна структура.

Ідеально охолодне середовище – середовище, яке вбирає тепло з поверхні сталі з нескінченно великою швидкістю.

Сутність методу торцевого гартування (ГОСТ 5657-69) полягає в тому, що зразок циліндричної форми діаметром 25 мм нагрівають до температури гартування, а далі у спеціальній установці гартують з торця струменем води. Прогартовуваність характеризується значенням твердості по довжині зразка. Твердість знижується у напрямку від торця, який охолоджується водою, до зони з напівмартенситною твердістю. Ця відстань називається характеристичною. При відомому значенні відстані за допомогою номограми визначають критичний діаметр зразка, який охолоджується при гартуванні зануренням у різні середовища, і реальний критичний діаметр у залежності від швидкості охолодження (рис. 3.2).

Номограмою користуються таким чином (рис. 3.3). Нехай характеристична відстань дорівнює x , мм. За шкалою "Відстань від загартованого торця до напівмартенситної зони" знаходимо значення x , далі опускаємо перпендикуляр до перетину з лінією "Ідеальне охолодження". З цієї точки проводимо горизонтальну лінію вліво до перетину з лініями, які відповідають середовищам охолодження. З цих точок опускаємо перпендикуляри на шкалу "Циліндр". У точках перетину з цією шкалою читаємо відповідь. Таким чином, при відомому критичному діаметрі можна вірно вибрати сталь для деталей визначених розмірів і призначення.

При наскрізній прогартуваності значення величин фізико-механічних властивостей змінюються від поверхні до

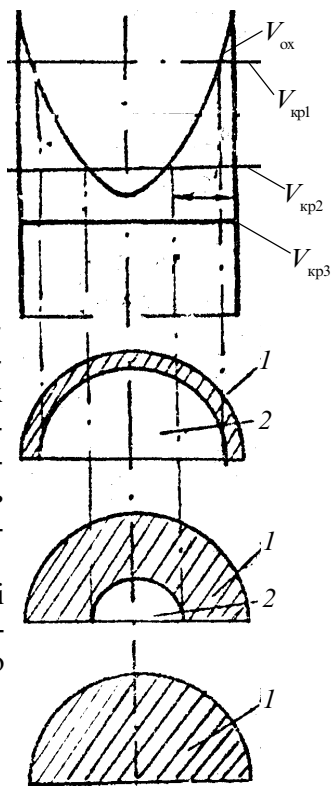


Рис. 3.2. Залежність прогартуваності від величини критичної швидкості охолодження:
1 – мартенсит; 2 – ферит + цементит

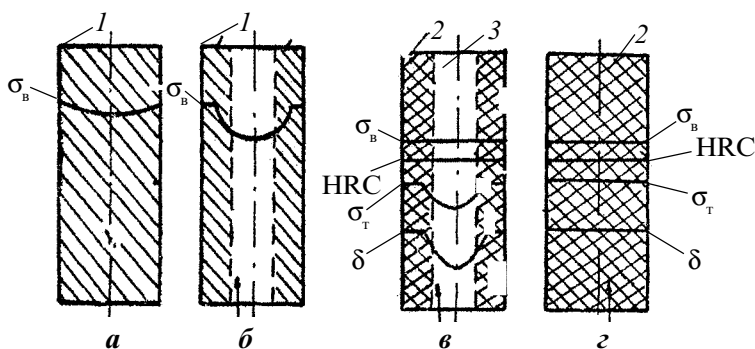


Рис. 3.3. Схеми впливу прогартуваності на механічні властивості загартованої (а,б) і відпущеної (з,в) сталі:

1 – мартенсит; 2 – ферит + цементит зернистий; 3 – ферит + цементит пластинчастий

серцевини (див. рис. 3.3); твердість після гартування від поверхні до серцевини падає, оскільки на поверхні утворюється структура мартенситу, а в серцевині – ферито-цементитну. Різницю твердості і границі міцності у незагартованій зоні можна усунути відпуском при високій температурі. Але границя плинності, ударна в'язкість і відносне звуження в серцевині залишаються низькими. Це пояснюється різним характером будови ферито-цементитної суміші. У гартованому шарі в результаті відпуску мартенситу утворюється ферито-цементита суміш зернистої будови, а у серцевині вона має пластинчасту будову.

Намагання підвищити прогартовуваність сталі пов'язане з необхідністю піддати поліпшенню якомога більший об'єм сталі і більш ефективно використати механічні властивості сталевих деталей.

Матеріали та прилади: нагрівальні печі, твердомір типу ТК-2, гартувальні баки з водою та мінеральним маслом, наждачний верстат для зачистки зразків, установка для визначення прогартовуваності, зразки досліджуваних сталей, номограми прогартовуваності.

Порядок виконання роботи

1. Заміряти твердість зразків досліджуваних сталей (35, 45, У8, ШХ15, Х12Ф) і дані занести до табл. 3.2.
2. Провести термічну обробку зразків відповідно до режимів (за табл. 3.1).
3. Зачистити зразки, заміряти їх твердість, дані занести до табл. 3.2.
4. Методом торцевого гартування визначити прогартовуваність сталі У10 та ШХ15 і дані занести до табл. 3.2.

Таблиця 3.2. Експериментальні дані

Марка сталі	Твердість зразка, HRC		Критичний діаметр, мм
	до термічної обробки	після термічної обробки	

Порядок оформлення звіту

1. Зарисувати стальну частину діаграми Fe – Fe₃C та указати на ній інтервал оптимальних температур гартування.
2. Зарисувати термокінетичну (ізотермічну) діаграму розпаду аустеніту для сталі У8. Нанести на ній швидкості охолодження, що відповідають різним охолодним середовищам.

3. Одержані експериментальні дані занести до табл. 3.2 та побудувати графіки залежностей "Твердість – температура нагрівання" для сталі У8; "Твердість – швидкість охолодження" для сталі У8; "Твердість при гартуванні з оптимальною температурою – вміст вуглецю" для сталей 35, 45, У8.

4. Побудувати графік "Твердість – відстань від торця" для сталі У10 та ШХ15. Користуючись монограмами, визначити $D_{кр}$ для різних середовищ. Дані занести до табл. 3.2.

5. Пояснити (письмово) одержані залежності, вказавши на оптимальну температуру гартування та швидкість охолодження для одержання мартенситу в сталі У8. Пояснити причини кращої загартовуваності сталі У8 у порівнянні зі сталями 35 і 45 та більш високу прогартовуваність сталі ШХ15.

Контрольні запитання

1. Що таке гартування?
2. Вибір оптимальних температур гартування. Вплив легуючих елементів.
3. Повне і неповне гартування, їх застосування для різних сталей.
4. Як впливають легуючі елементи на зростання зерна аустеніту?
5. За діаграмою ізотермічного перетворення аустеніту у сталі У8 пояснити вплив швидкості охолодження на структуру.
6. Що таке перліт, сорбіт, троостит?
7. Що таке мартенситне перетворення? Будова та властивості мартенситу.
8. Що таке критична швидкість охолодження? Фактори, від яких вона залежить.
9. Як впливають легуючі елементи на технологічні параметри термічної обробки сталей?
10. Як впливають вуглець та легуючі елементи на температури M_n , M_s , на кількість $A_{з\text{ал}}$?
11. Що таке загартовуваність і прогартовуваність?

Лабораторна робота № 4

ТЕРМІЧНА ОБРОБКА ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

Мета роботи: вивчити особливості та дослідити вплив режиму термічної обробки зварних з'єднань на їх мікроструктуру і механічні властивості.

Загальні відомості

Термічна обробка сталі взагалі і термічна обробка зварних з'єднань зокрема включають різні операції теплової дії на метал, які супроводжуються змінами структури, фазового, пружного станів, властивостей, рівня вільної енергії фаз, величини і розподілу мікро- і макронапруги.

Для сталей, різних за складом і фазово-структурним станом, і відповідно для їх зварних з'єднань, у залежності від установлені мети, застосовують різні види термічної обробки, які відрізняються різними умовами нагрівання до встановленої температури, тривалістю витримки при цій температурі, умовами охолодження.

За ступенем розвитку деформації металу в зоні зварювання і нагріванням, яке викликає зміни структурного і фазового стану, можна виділити зварювання тиском без нагрівання і з нагріванням, а також плавленням з присадкою і без неї (табл. 4.1).

Таблиця 4.1. Розподіл видів зварювання в залежності від деформуючої і теплової дії

Вид зварювання	Дія	
	деформуюча	теплова
Зварювання тиском без нагрівання	Прикладання значних зусиль, що викликає пластичну деформацію в зоні зварювання	Незначна
Зварювання тиском з нагріванням	Прикладання помірних зусиль, що викликає пластичну деформацію нагрітого металу	Нетривале нагрівання зони термічного впливу зварного з'єднання
Зварювання плавленням з присадкою і без неї	Відсутня	Нагрівання ЗТВ з різною тривалістю

Різні види зварювання плавленням мають різну за інтенсивністю теплову дію у ЗТВ (рис. 4.1).

Термічний вплив у зоні зварювання викликає деформаційні і структурні зміни. Деформація в зоні теплової дії пов'язана з нерівномірним розподілом температур у напрямку від осі шва до зварюваного металу.

Такий розподіл температур призводить до нерівномірної пластичної деформації після нагрівання при зварюванні (рис. 4.2,а).

При цьому в рідкому металі зварювальної ванни деформація відсутня.

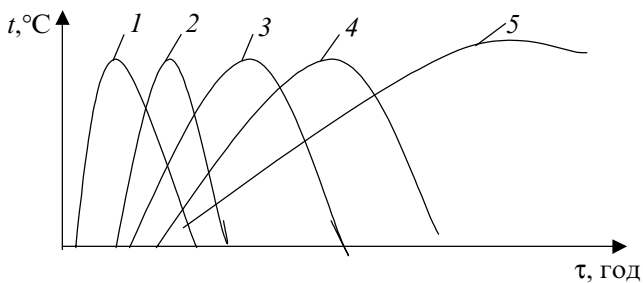


Рис. 4.1. Схема термічних циклів різних видів зварювання:
 1 – електронно-променеве; 2 – газоелектричне (плазмове); 3 – ручне дугове;
 4 – автоматичне під флюсом; 5 – електрошлакове

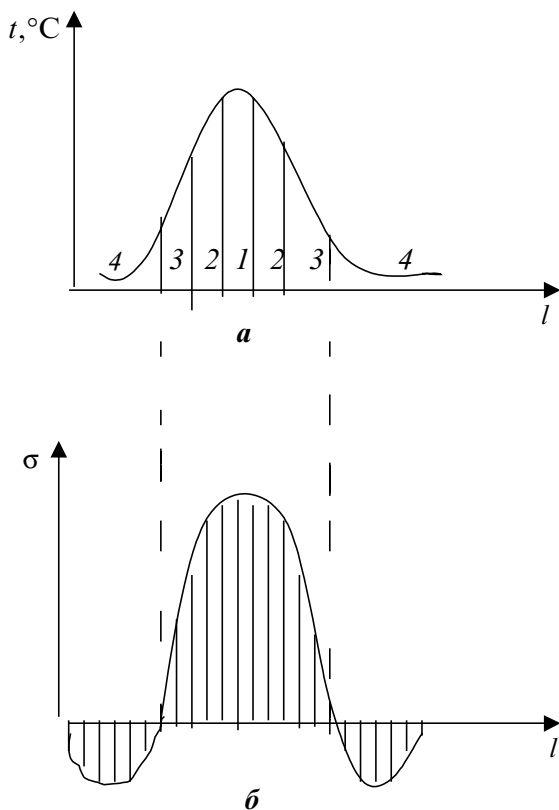


Рис. 4.2. Розподіл температур (а) та поздовжньої залишкової напруги (б) у зварному з'єднанні

Зона 2–2, яка нагрівається вище від температури повної втрати пружних властивостей, значно деформується завдяки тепловій зміні об'єму. У зоні 3–3, яка знаходиться при температурі часткової втрати пружних властивостей, пластична деформація в результаті збільшення об'єму буде меншою і до межі з пружною зоною 4–4 залишатиметься з тим же знаком (рис. 4.2,б). Зона 4–4, яка межує з нагрітим основним металом, а також ненагрітий основний метал, що знаходиться біля межі, стають пружно стиснутими (див. рис. 4.2,б).

Існують технологічні й термічними способи зниження залишкової зварної напруги. *Технологічні* способи зводяться головним чином до регулювання погонної енергії при зварюванні і дотримання певної послідовності зварювання. *Термічними* способами є попереднє нагрівання перед зварюванням або попутне зварюванню нагрівання (локальне чи об'ємне) і високий відпуск. Підігрівання виробів, які зварюються, зменшує градієнт температур між різними зонами зварного з'єднання і зменшує різницю температурних об'ємних змін у металі. Крім того, підігрівання, яке підвищує температуру металу в зоні теплового впливу, визначає розпад переохолодженого аустеніту при більш високих температурах з утворенням більш рівноважних структур.

Термічна обробка зварних конструкцій переслідує дві основні цілі: зняття залишкової напруги і відновлення властивостей металу у ЗТВ зварювального джерела тепла. Релаксація (зняття) залишкової напруги здійснюється найбільш інтенсивно при температурах вище 600 °С. При цьому рівень залишкової напруги знімається протягом години. Наступна витримка неефективна. Високий відпуск є основною термічною операцією, яка дозволяє суттєво знизити залишкову зварну напругу завдяки протіканню процесу релаксації.

Слід враховувати, що при безперервному охолодженні виробів у процесі термічної обробки може виникнути нова залишкова напруга, яка не пов'язана з процесом зварювання. Найбільшу небезпеку викликає охолодження в інтервалі температур 600...300 °С після термообробки. В цьому інтервалі температур швидкість охолодження не повинна перевищувати перепад температур 50 °С. Після 300 °С швидкість охолодження може бути більшою.

Для зварних конструкцій із низько- і середньолегованих ма-

рок сталей велике значення має позбавлення від загартованих зон, які утворюються при зварюванні. Відновити структуру і властивості у цих зонах можна відпуском при температурах 620...680 °С. Мінімальна і максимальна температура відпуску для різних марок сталі змінюється у визначених інтервалах і повинна вибиратися з довідника або визначатися експериментально. Ефективність термічної обробки після зварювання визначається сукупністю двох факторів: впливом залишкового напруження і знеміцненням металу шва і ЗТВ.

Доцільність термічної обробки зварних конструкцій вирішується у кожному окремому випадку з урахуванням впливу залишкової напруги, властивостей металу в області зварного шва і ЗТВ, з урахуванням окиснення поверхні металу при нагріванні під термічну обробку, а також форми і розміру конструкцій, марки сталі, технологічного процесу зварювання, умов експлуатації.

Технологія виготовлення зварних конструкцій обумовлює два способи виконання термічної обробки: об'ємний і місцевий (локальний). Кожен з них має свої переваги і недоліки. Перевагою *об'ємної* обробки є відсутність помітного перепаду температур у виробі, який термообробляється, що не викликає появи додаткової залишкової напруги. Цей тип термічної обробки є основним методом зняття залишкової напруги для складних компактних конструкцій, які мають велику кількість зварних вузлів. Недоліком об'ємної термічної обробки є, в першу чергу, необхідність спеціального дорогого обладнання, а також довготривалість циклу, що пов'язано зі значними енергетичними витратами.

Місцева термічна обробка не потребує громіздкого пічного обладнання, а можливість застосування високоефективного нагрівального устаткування забезпечує рівномірне і швидке нагрівання зони зварювання, що є більш економічним. Недоліками місцевої термічної обробки є поява додаткової залишкової напруги, погіршення властивостей металу в зонах перепаду температур.

При термічній обробці зварних конструкцій належить враховувати наступне:

температура печі при завантаженні виробів не повинна перевищувати 350 °С;

швидкість нагрівання при об'ємній термічній обробці не повинна перевищувати 200 °С/год при товщині елементів до 25 мм і 100 °С/год при більшій товщині;

для зварних конструкцій із термічно зміцнених сталей темпе-

ратура відпуску повинна бути на 20...40 °С нижчою за температуру основного відпуску;

для зварних конструкцій із марок сталей, які утворюють крихкі структури, термічна обробка повинна виконуватися безпосередньо після зварювальних робіт;

тривалість витримки при відпуску повинна забезпечувати повне протікання структурних перетворень, зняття напруги і рівномірність прогрівання;

швидкість охолодження повинна виключати можливість утворення додаткової напруги і деформації конструкції (охолодження може здійснюватися у печі до 350 °С, далі – на повітрі);

при місцевій термічній обробці необхідно зменшити перепад температур у перерізі виробу, що зменшить додаткову залишкову напругу, яка виникає. Для цього здійснюють термоізоляцію. Для посудин і трубопроводів належить забезпечити ширину рівномірного розігрівання не менше $1,25\sqrt{RS}$ на кожную сторону шва, де R – середній радіус; S – товщина стінки виробу;

в усіх випадках для термічної обробки після зварювання режими вибираються з урахуванням хімічного складу металу шва і основного металу, розмірів і конфігурації виробу, вимог, які висувають до зварних конструкцій, та умов експлуатації.

Після електрошлакового зварювання структура шва і ЗТВ має ряд особливостей, що викликає необхідність застосування термічної обробки з нагріванням вище критичних точок.

При місцевій термічній обробці нагрівання стикового зварного шва і ЗТВ здійснюють на відстань 400...500 мм по обидві сторони від шва.

Термічна обробка зварних з'єднань низьковуглецевих сталей

Низьковуглецеві нелеговані сталі термічній обробці майже не піддаються. В окремих випадках з метою здрібнення зерна, зняття слідів наклепу, поліпшення оброблюваності різанням ці сталі піддають нормалізації. При нормалізації поліпшується їх холодостійкість. Питання про термічну обробку зварних з'єднань таких сталей більш складне. Доцільною термічною обробкою для них є нормалізація і високий відпуск. Призначення того чи іншого виду термічної обробки або відмова від неї визначається багатьма умовами: товщиною зварних елементів, умовами зварювання, призначенням і умовами роботи виробу.

Нормалізація зварних з'єднань може забезпечити деяке покращення властивостей перекристалізації та здрібнення зерна, тому термообробка доцільна при одношаровому зварюванні під флюсом металу великої товщини, при електрошлаковому зварюванні, при ручному дуговому зварюванні електродами діаметром 5,6 мм. Нормалізація поліпшує структуру шва і ЗТВ, підвищує в'язкість металу цих зон і холодноламкість. Нормалізація доцільна при нагріванні всього виробу. Локальне нагрівання для нормалізації тільки зони зварного з'єднання може призвести до утворення залишкової напруги розтягування у цій зоні. Ця напруга не менша за залишкові напруги, які виникають після зварювання. Зменшувати швидкість охолодження при нормалізації не доцільно, тому що це не дозволяє забезпечити необхідний ефект – здрібнення зерна.

Високий відпуск зварних з'єднань низьковуглецевих сталей не змінює структурного стану металу, але зменшує рівень залишкової зварної напруги, яка при експлуатації може негативно вплинути на працездатність конструкцій. Високий відпуск може бути як локальним, так і об'ємним, швидкість охолодження після локального відпуску бажано обмежити, щоб знизити величину залишкової напруги, пов'язаної з локальним нагріванням.

Схильність до корозійного розтріскування зварних з'єднань низьковуглецевих сталей, які не загартовуються, визначається наявністю пружних або пластичних деформацій металу, що викликаються зовнішньою або внутрішньою напругою, а частіше їх сумою. Зовнішню напругу можна змінити регулюванням навантаження на виріб, а внутрішню – технологією зварювання або відпуском після зварювання.

Роль технології зварювання може бути різною. Підігрівання перед зварюванням або в процесі зварювання зменшує градієнт температур між зоною зварного з'єднання і основним металом і цим знижує величину залишкової зварної напруги. Багатошарове зварювання невеликими валиками призводить до зниження рівня залишкової напруги, тому що при зварюванні кожного наступного шару буде здійснюватися нагрівання попереднього і, відповідно, зниження залишкової напруги. Температура навколишнього повітря впливає на рівень залишкової напруги. Низька температура призводить до збільшення температурного градієнта і зростання залишкової напруги. Зниження швидкості охолодження піс-

ля зварювання за допомогою теплоізоляції зварного з'єднання, як і збільшення погонної енергії (при однакових інших умовах), веде до зниження рівня залишкової напруги. Тому проведення термічної обробки залежить від технології зварювання.

Вміст вуглецю у сталі впливає на визначення термічної обробки зварного з'єднання. У сталі з меншим вмістом вуглецю (сталь 10) границя плинності нижча, ніж у сталі з більшим вмістом (сталь 20). У першій вона складає 180 МПа, у другій – 240 МПа. Така різниця призводить до того, що робоча і залишкова напруги у зварній конструкції зі сталі 20 і умови, які впливають на здійснення термічної обробки зварних з'єднань, будуть різними.

Треба враховувати і товщину металу, який зварюється, оскільки з її збільшенням зростає величина залишкової напруги і, відповідно, збільшується необхідність призначення відпуску після зварювання.

На основі перелічених факторів, які впливають на величину залишкової напруги, у табл. 4.2, 4.3 наведені орієнтовні режими термічної обробки зварних з'єднань сталей 10 і 20.

Таблиця 4.2. Режими термічної обробки зварних з'єднань зі сталей 10, 20, які працюють поза середовищами, що викликають корозійне розтріскування

Товщина зварюваного металу, мм	Марка сталі	Вид зварювання	Температура, °С		Термо-обробка
			повітря при зварюванні	підігрівання	
До 25	10, 20	Без обмежень	Без обмежень	Відсутнє	Не потрібна
25...45	10	Багатошарове з валиками висотою до 4 мм	Вище 15	Відсутнє	Не потрібна
			Нижче 15	Відсутнє	Відпуск при 550 °С
				100	Не потрібна
		Автоматичне під флюсом з шарами товщиною більше 8 мм, електрошлакове	Вище 15	Відсутнє	Не потрібна
			Нижче 15	Відсутнє	Відпуск при 600 °С
				100	Не потрібна

Продовж. табл. 4.2

Товщина зварюваного металу, мм	Марка сталі	Вид зварювання	Температура, °C		Термообробка
			повітря при зварюванні	підігрівання	
25...40	20	Багатошарове з валиками висотою до 4 мм	Вище 10	Відсутнє	Відпуск при 600 °C
				150	Не потрібна
			Нижче 10	Відсутнє	Відпуск при 650 °C
				200	Не потрібна
		Автоматичне під флюсом з шарами товщиною більше 8 мм	Вище 10	Відсутнє	Відпуск при 550 °C
				150	Не потрібна
			Нижче 10	Відсутнє	Відпуск при 550 °C
				200	Не потрібна

Таблиця 4.3. Режими термічної обробки зварних з'єднань зі сталей 10; 20, які працюють у середовищах, що викликають корозійне розтріскування

Товщина зварюваного металу, мм	Марка сталі	Вид зварювання	Температура, °C		Термообробка
			повітря при зварюванні	підігрівання	
До 13	10, 20	Без обмежень	Без обмежень	Відсутнє	Не потрібна
13...25	10	Багатошарове з валиками висотою до 4 мм	Вище 5	Відсутнє	Не потрібна
			Нижче 5	Відсутнє	Відпуск при 550 °C
				100	Не потрібна

Продовж. табл. 4.3

Товщина зварюваного металу, мм	Марка сталі	Вид зварювання	Температура, °C		Термообробка
			повітря при зварюванні	підігрівання	
13...25	10	Автоматичне під флюсом в 1–2 шари	Вище 5	Відсутнє	Відпуск при 550 °C
					Не потрібна
			Нижче 5	100	Відпуск при 550 °C
25...40	20	Багатошарове з валиками висотою до 4 мм	Вище 0	Відсутнє	Відпуск при 550 °C
				150	Не потрібна
			Нижче 0	Відсутнє	Відпуск при 550 °C
				200	Не потрібна
		Без обмежень в 1–2 шари	Вище 0	Відсутнє	Відпуск при 650 °C
				150	Не потрібна
			Нижче 0	Відсутнє	Відпуск при 650 °C
				200	Не потрібна

Термічна обробка зварних з'єднань низьколегованих сталей

Термічну обробку зварних з'єднань низьколегованих сталей у багатьох випадках здійснюють не тільки з метою зняття залишкової напруги, а і для усунення впливу нагрівання при зварюванні на фазовий стан і структуру ЗТВ, а в окремих випадках і покращення структури металу шва.

За змінами структури і властивостей, які можуть відбуватись у ЗТВ, низьколеговані сталі поділяються на три групи:

сталі, які при зварюванні у ЗТВ можуть утворювати елементи нерівноважних структур (бейніту, мартенситу), що обумовлює зміцнення цих ділянок та зниження їх пластичності, ударної в'язкості і холодостійкості;

сталі, у яких досягнутий комплекс властивостей пов'язаний зі зміцненням дисперсною фазою (карбідами, нітридами);

сталі, у яких властивості визначаються дуже дрібнозернистою структурою і наявністю зміцнювальної дисперсної фази.

До першої групи відносяться сталі, леговані 1,3...1,8 % Мп, інколи до 0,9 % Сг. Про утворення елементів нерівноважних структур свідчить більш висока твердість ЗТВ (НВ 220...240) у порівнянні з ЗТВ нелегованих сталей (до НВ 180) навіть з більш високим вмістом вуглецю.

До цієї групи належать сталі 09Г2, 09Г2С, 10ХСНД, 15ХСНД, 17ГС, 14ХГС та ін. Призначення термічної обробки зварних з'єднань (табл. 4.4) – це створення умов для розпаду елементів нерівноважних структур і відновлення властивостей у ЗТВ зварюваної сталі.

Таблиця 4.4. Режими термічної обробки зварних з'єднань низьколегованих низьковуглецевих сталей

Робоче середовище	Товщина зварюваного металу, мм	Температура, °С		Термообробка
		повітря при зварюванні	підігрівання	
Корозійно-активне	Менше 25	Вище 20	–	–
		Нижче 20	150	–
	Більше 25	Вище 10	150	–
		Нижче 10	150	Відпуск при 600 °С
Середовище, що викликає корозійне розтріскування	Менше 25	Вище 10	150	Відпуск при 600 °С
	Більше 25	Нижче 0	150	Відпуск при 600 °С

Комплекс властивостей сталей другої групи досягається виділенням зміцнювальної дисперсної фази (карбідів або карбонітрідів). До цієї групи належать сталі 15Г2АФ, 17Г2САФ, 12Г2ФАЮ та ін. Високий комплекс властивостей сталей третьої групи – малоперлітних і бейнітних (30ХГСНА, 30ХГСА, 20ХГСА та ін.) – досягається за рахунок термомеханічного зміцнення, яке забезпечує дрібнозернисту структуру, і ефекту зміцнення дисперсною карбідною та інтерметалевою фазами.

Зміну властивостей ЗТВ цих сталей при зварюванні можна звести до мінімуму шляхом зниження погонної енергії і збільшення швидкості охолодження після зварювання. Деяке покращення властивостей зварних з'єднань вищезгаданих сталей другої групи може бути досягнуто при нормалізації, яка доцільна тільки для всього виробу.

Високий відпуск зварних з'єднань термозміцнених сталей може бути доцільним тільки з метою зниження рівня залишкової напруги і розпаду нерівноважних структур на ділянках ЗТВ, які нагріваються при зварюванні вище 900 °С. Суттєвий вплив на зменшення розмірів зони і ступеня знеміцнення можна здійснити регулюванням термічного циклу зварювання за рахунок попутного охолодження.

Термічна обробка зварних з'єднань низьколегованих теплостійких сталей

Низьколеговані теплостійкі сталі, як правило, містять до 0,2 % С, 1...2 % Cr, до 0,5 % Мо і до 0,3 % V. Склад цих сталей обумовлює деякі особливості структурних перетворень у ЗТВ при зварюванні і деякі особливості їх термічної обробки (табл. 4.5).

Таблиця 4.5. Режими термічної обробки зварних з'єднань низьколегованих теплостійких сталей

Марка сталі	Тип металу шва	Товщина зварюваного металу, мм	Температура підігрівання	Термообробка	Примітки
12ХМ, 15ХМ	09ХМ	≤10	–	Відпуск при 680...710 °С (1 год)	Відпуск локальний або об'ємний, нормалізація всього виробу
		11...25	150	Нормалізація для термообробленого металу 930...950 °С (0,25 год) Відпуск при 680...710 °С (1 год)	
		>25	200	Те ж (1,5 год)	
12ХМФ, 15ХМФ	09ХМФ	≤10	150	Відпуск при 720...740 °С (3 год)	Допускається об'ємна нормалізація нагріванням до 980 °С і витримкою протягом 0,25...0,5 год після прогрівання
		11...25	200	Те ж (3...4 год)	
		>25	250	Те ж (4 год)	

Особливості перетворень у ЗТВ пов'язані з тим, що легуючі елементи, які входять до складу цих сталей, підвищують стійкість аустеніту, що утворюється при нагріванні, а це призводить до його розпаду при охолодженні в області низьких температур з утворенням дисперсних і частково нерівноважних структур розпаду.

У зв'язку з цим твердість металу ЗТВ даних сталей помітно підвищується до HV 350. Тому відпуск зварних з'єднань цих сталей, як правило, необхідний не тільки для зниження рівня зварної напруги, але і для розпаду нерівноважних структур, зниження твердості і підвищення ударної в'язкості з метою попередження крихкого руйнування цих з'єднань. На будову металу шва таких сталей впливає нормалізація, яка забезпечує перекристалізацію і здрібнення зерна.

Термічна обробка зварних з'єднань високолегованих хромистих сталей

Високолеговані хромисті сталі містять від 11 до 28 % Cr і невеликі кількості Mo, W, V, Nb та інших елементів. У безнікелевих високохромистих сталях в умовах нагрівання при зварюванні може відбуватися $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -перетворення, тому структура може бути частково або повністю мартенситною, оскільки при високому вмісті легуючих елементів у сталі або у металі шва $\gamma \rightarrow \alpha$ -перетворення при охолодженні, як правило, проходить в області знижених температур (нижче M_{π}) з утворенням мартенситу (повністю або частково).

Високий вміст Cr та інших легуючих елементів знижує теплопровідність сталей, а це призводить до збільшення градієнта температури у перерізі, що супроводжується зростанням залишкової напруги. При цьому зниження швидкості охолодження для зменшення градієнта температур не застосовують, тому що ці сталі при повільному охолодженні в інтервалі температур 470...500 °C стають крихкими.

Для високохромистих сталей, які експлуатуються у корозійно-активних середовищах, застосовують відпуск при 710...750 °C або гомогенізацію при 1000...1100 °C.

Термічна обробка зварних з'єднань високохромистих сталей визначається багатьма факторами і, насамперед, структурами сталі і металу шва, призначенням і умовами роботи конструкції (табл. 4.6).

Таблиця 4.6. Режими термічної обробки зварних з'єднань високохромистих сталей

Марка сталі	Структура	Тип металу шва	Температура підігрівання, °С	Термообробка	HV, не більше
20X13	Мартенсит	10X13	300	Відпуск при 680...760 °С	5000/2000
15X11МФ		12X11МНФ		Те ж при 740...770 °С	4000/2000
12X13	Мартенсит	10X13	250...300	Відпуск при 700...750 °С	4000/1800
14X17Н2		12X17 12X13		Те ж при 740...770 °С	4000/1800
08X13	Ферит	12X13	200	–	2000/–

Примітка. У чисельнику значення твердості ЗТВ до термічної обробки, у знаменнику – після термічної обробки.

Термічна обробка зварних з'єднань аустенітних сталей

Високолеговані хромонікелеві сталі найчастіше не є однорідними аустенітними, а після гарячої і холодної прокатки містять в різній кількості ферит і карбіди.

При зварюванні аустенітних сталей розподіл температур у ЗТВ призводить до того, що у ній створюються ділянки різного фазового складу.

Причиною зниження корозійної стійкості зварних з'єднань таких сталей, що експлуатуються при температурі 500...600 °С, вважається збіднення границь зерен аустеніту хромом внаслідок виділення його карбідів.

Такі процеси здійснюються на ділянках, які при зварюванні нагрівалися до температур 900...1100 °С і дещо вище, навіть при наявності активних карбідоутворюючих елементів (Ti, Nb). У зв'язку з цим корозія ЗТВ здійснюється по границям зерен (межкристалітна корозія). Для запобігання такій корозії зварних з'єднань аустенітних сталей, наприклад 08X18Н10Т, що експлуатуються у корозійно-активних середовищах при підвищених температурах (500...600 °С), їх треба піддавати термічній обробці, яка полягає у стабілізуючому відпалі при 900 °С протягом 3...5 год.

Аустенітні сталі доцільно застосовувати для конструкцій, які

працюють при низьких температурах, оскільки вони мають високу в'язкість і холодостійкість. Для зварних конструкцій, що експлуатуються при низьких температурах, для покращення в'язкості і холодостійкості застосовують аустенізацію з нагріванням до 1150 °С.

Матеріали, зразки та прилади: твердомір типу ТК-2, нагрівальні печі, мікроскоп МІМ-7, зразки для замірів твердості, мікрошліфи досліджуваних зварних з'єднань (табл. 4.7), наждачний папір для зачистки зразків.

Таблиця 4.7. Зразки для замірів твердості і мікрошліфи зварних з'єднань

Марка сталі	Умовний номер зразка (мікрошліфа)	Кількість проходів при зварюванні
Сталь 20		1
		2
09Г2		1
		2
10ХСНД		1
		2
15ХМ		1
20Х13		1
08Х18Н10Т		1
		2

Порядок виконання роботи

1. Заміряти твердість ЗТВ зразків зварних з'єднань і дані занести до табл. 4.8.
2. Вибрати відповідні режими термічної обробки зварних з'єднань.
3. Провести термічну обробку зразків зварних з'єднань.
4. Зачистити зразки і заміряти твердість ЗТВ; дані занести до табл. 4.8.
5. Дослідити мікроструктуру зварних з'єднань до і після термічної обробки і дані занести до табл. 4.8.

Порядок оформлення звіту

1. Коротко сформулювати мету роботи.
2. Навести дані про особливості термічної обробки зварних з'єднань із низьколегованих, низьковуглецевих, високохромистих та аустенітних сталей.

3. Одержані експериментальні дані та характеристику мікроструктури ЗТВ зварних з'єднань занести до табл. 4.8.

4. Обґрунтувати одержані дані твердості та характеристики мікроструктури ЗТВ зварних з'єднань.

Таблиця 4.8. Режими термічної обробки, твердість та характеристика мікроструктури ЗТВ зварних з'єднань (товщина зварюваного металу 5 мм)

Марка сталі	Умовний номер зразка (мікрошліфа)	Кількість проходів при зварюванні	Твердість ЗТВ, HRC, та характеристика мікроструктури	Режим термічної обробки	Твердість ЗТВ, HRC, та характеристика мікроструктури після термообробки
1	2	3	4	5	6

Примітка. Твердість визначається як середня величина трьох замірів.

Контрольні запитання

1. З якою метою проводять термічну обробку зварного з'єднання?

2. Дати характеристику теплової дії на метал різних видів зварювання.

3. Проаналізуйте розподіл температур та поздовжньої залишкової напруги у зварному з'єднанні.

4. У чому полягає процес релаксації залишкової напруги?

5. Які фактори визначають необхідність і доцільність термічної обробки зварних з'єднань?

6. Які види і способи виконання термічної обробки зварних з'єднань застосовують у виробництві?

7. Дайте характеристику способам виконання термічної обробки зварних з'єднань.

8. Проаналізуйте вимоги до виконання термічної обробки зварних з'єднань.

9. Назвіть особливості термічної обробки електрошлакових зварних з'єднань.

10. Проаналізуйте доцільність термічної обробки низьковуглецевих сталей.

11. З якою метою проводять термічну обробку зварних з'єднань низьковуглецевих низьколегованих сталей?

12. Які зміни структури і властивостей можуть здійснюватися у ЗТВ низьковуглецевих низьколегованих сталей та яку термічну обробку призначають зварним з'єднанням із цих сталей?

13. Особливості термічної обробки зварних з'єднань низьколегованих теплостійких сталей.

14. Особливості термічної обробки зварних з'єднань високолегованих хромистих сталей.

15. Як впливає термічний цикл зварювання на холодо- і корозійну стійкість аустенітних сталей?

16. Особливості термічної обробки зварних з'єднань аустенітних сталей.

Лабораторна робота № 5

ВПЛИВ ХІМІКО-ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ВИРОБІВ ЗІ СТАЛЕЙ

Мета роботи: дослідити вплив хіміко-термічної обробки (ХТО) на структуру і властивості поверхневого шару виробів зі сталі; ознайомитися з технологією ХТО (цементацією, азотуванням).

Загальні відомості

Багато виробів повинні мати високу поверхневу твердість, міцний поверхневий шар і в'язку серцевину. Таке сполучення властивостей досягається поверхневим зміцненням виробів, виготовлених зі сталей з достатньою пластичністю і задовільною міцністю. До методів поверхневого зміцнення належать: ХТО, поверхневе гартування та поверхнева пластична деформація.

Хіміко-термічна обробка – це технологічний процес дифузійного насичення поверхневого шару виробів із зовнішнього середовища різними елементами одночасно з тепловим впливом з метою зміни його складу і структури, а отже, і властивостей.

ХТО – один із найбільш ефективних методів підвищення довговічності деталей машин за рахунок збільшення твердості і міцності, опору зносу та втомленості, контактної витривалості, а в ряді випадків – антикорозійних, антиерозійних властивостей та окалинотійкості. Після ХТО змінюються хімічний і фазовий склад, структура і, як наслідок, властивості поверхневого шару. Дифузійне насичення металів і сплавів можливе лише при підвищеній

температурі, коли стає помітною рухомість атомів насичувального елемента.

Для зміни хімічного складу виробів їх нагрівають в активному середовищі. При цьому відбуваються такі процеси: утворення насичувального елемента в активному (атомарному) стані; адсорбція атомів поверхнею виробів; дифузія атомів від поверхні у глибину виробу.

Основними кількісними характеристиками дифузійного шару є його глибина, концентрація насичувального елемента і твердість поверхні. При ХТО глибина шару залежить від багатьох факторів: насичувального елемента, його активності в насичувальному середовищі; тривалості та температури насичення; хімічного складу сталі. Наприклад, при насиченні елементами, які утворюють тверді розчини проникнення, швидкість формування шару в багато разів вища, ніж при утворенні твердих розчинів заміщення, тому що дифузійна рухомість атомів проникнення на декілька порядків вища за рухомість атомів заміщення. Підвищення температури насичення при однаковій тривалості приводить до збільшення глибини дифузійного шару по експоненті і в практичній діяльності використовується як один із методів інтенсифікації процесів ХТО.

У залежності від стану речовини-постачальника насичувальних атомів розрізняють насичення з газової, рідкої та твердої фаз.

Окрім того, всі види ХТО поділяють на дві групи:

дифузійне насичення неметалами: цементація (насичення вуглецем), ціанування (насичення вуглецем і азотом), азотування (насичення азотом);

дифузійне насичення металами (дифузійна металізація): хромом, алюмінієм, силіцієм, титаном та ін.

У промисловості найбільш поширеними є методи насичення неметалами.

Цементація – процес дифузійного насичення вуглецем поверхневих шарів сталейних виробів. Цементовані вироби повинні мати поверхневу твердість ≥ 56 HRC, підвищену зносостійкість поверхні та в'язку серцевину. Тому для їх виготовлення використовують маловуглецеві (0,1...0,25 % C) сталі: 10, 15, 20, 15X, 18ХГТ, 12ХН3А, 18Х2Н4А та ін.

Розчинність вуглецю у фериті мала, тому цементацію сталі проводять в аустенітному стані (при температурі вище A_{c_3} для

цементованої сталі). Цементация відбувається при температурі 870...1050 °С. Підвищення температури цементации приводить до зростання аустенітного зерна, погіршення механічних та експлуатаційних властивостей шару і серцевини. Оптимальним поверхневим вмістом вуглецю в шарі вважається 0,8...1,1 %. При меншому вмісті вуглецю не досягається потрібна твердість поверхні, а при більшому – в цементованому шарі утворюється карбідна сітка, внаслідок чого він стає крихким.

Глибина шару найчастіше знаходиться в межах 0,6...1,3 мм, на деталях зі значними розмірами вона може досягати 4...6 мм. При однакових умовах підвищення температури цементации скорочується тривалість насичення. Наприклад, тривалість процесу для досягнення глибини шару 1 мм у сталі 10 при 900 °С становить 6 год, а при 970 °С – 4...5 год.

Речовини-постачальники вуглецю при цементации називаються *карбюризаторами*. В залежності від виду карбюризатору розрізняють газову і цементацию в твердому карбюризаторі.

Цементация у твердому карбюризаторі. У цьому процесі середовищем, яке насичує поверхню вуглецем, є деревне вугілля (дубове або березове) розміром 3,5...10 мм або кам'яновугільний напівкокс чи торф'яний кокс, до яких додають активізатори: вуглекислий барій (BaCO_3) і соду кальциновану (Na_2CO_3) у кількості 10...40 % від маси вугілля.

Карбюризатор, що широко застосовується, складається із деревного вугілля, 2...25 % BaCO_3 і приблизно 3,5 % CaCO_3 , який додається для запобігання спіканню частинок карбюризатора. Деталі, які піддають цементации, після попередньої очистки поміщають у ящики: зварні сталіні прямокутної або циліндричної форми. На дно ящика насипають та утрамбовують шар карбюризатору товщиною 20...30 мм, на який укладають перший ряд деталей, витримуючи відстань між ними і до бокових стінок ящика 10...15 мм. Далі засипають і утрамбовують шар карбюризатору товщиною 10...15 мм, на нього укладають наступний ряд деталей і т.д. Останній (верхній) ряд деталей засипають шаром карбюризатору товщиною 35...40 мм для комплектації його усадки. Ящик накривають кришкою, кромки якої обмазують вогнетривкою глиною, і поміщають у піч.

Нагрівання до температури цементации (910...930 °С) здійснюється за 7...9 хв на кожний сантиметр мінімального розміру

ящика. Тривалість витримки при температурі цементації для ящика з мінімальним розміром 150 мм складає 5,5...6,5 год, щоб одержати цементований шар товщиною 700...900 мкм, і 9...11 год – товщиною 1200...1500 мкм. Після цементації ящик охолоджують до 400...500 °С і відкривають.

При нагріванні в результаті взаємодії деревного вугілля і залишку кисню утворюється оксид вуглецю CO, який на поверхні металевих виробів розпадається за реакцією $2\text{CO} \rightarrow \text{C} + \text{CO}_2$ з утворенням атомарного вуглецю. Останній "поглинається" металом, а CO_2 після взаємодії з деревним вугіллям відновлюється до CO.

При *газовій цементації* використовують як карбюризатор спеціально приготовлену суміш газів (ендогаз), природний газ, рідкі вуглеводи (гас, синтин, піробензол). Деталі за допомогою спеціальних пристроїв завантажуються в цементаційні печі, в яких природний газ і органічні рідини дисоціюють з утворенням атомарного вуглецю, наприклад, $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$.

Газова цементація має ряд переваг порівняно з цементацією в твердому карбюризаторі: можливі механізація і регулювання насичення, менша тривалість процесу. У зв'язку з цим газова цементація використовується в масовому та серійному виробництві.

Після цементації максимальний вміст вуглецю на поверхні виробів поступово зменшується по перерізу деталі до початкового вмісту в серцевині. Наприклад, у цементованій деталі зі сталі 10 концентрація вуглецю зменшується від 1,0 % на поверхні до 0,1 % в серцевині. Структура деталей, повільно охолоджених після цементації, близька до рівноважної і залежить від вмісту вуглецю: в заевтектоїдній частині шару – перліт з сіткою вторинних карбідів, у евтектоїдній – перліт, у доевтектоїдній – перліто-ферит із зростанням долі фериту в напрямку до серцевини. Указані структури мають низький рівень твердості, тому для досягнення значної поверхневої твердості та високих експлуатаційних властивостей лише однієї цементації недостатньо. Вони забезпечуються заключною термічною обробкою – гартуванням та відпуском. У залежності від марки цементованої сталі, температури цементації, призначення деталей та ін., можливими є такі основні технологічні схеми:

цементація, повільне охолодження, гартування від температури $A_{c1} + 30...50$ °С, відпуск низькотемпературний (150...200 °С для маловідповідальних деталей);

цементация, повільне охолодження, подвійне гартування, відпуск низькотемпературний (для важко навантажених деталей відповідального призначення). Перше гартування (температура вище A_{c_3}) використовують для перекристалізації та подрібнення зерен в серцевині, які виростили при високих температурі і тривалості цементації, а також для розчинення цементитної сітки у заєвтектоїдній зоні шару. Друге гартування (температура $A_{c_1} + 30 \dots 50 \text{ }^\circ\text{C}$) забезпечує дрібнозернисту мартенситну структуру шару та збереження дрібних глобулярних карбідів у заєвтектоїдній частині шару;

цементация, охолодження в печі до температури гартування сталі ($A_{c_1} + 30 \dots 50 \text{ }^\circ\text{C}$), гартування (так зване гартування з цементаційного нагріву), відпуск низькотемпературний. Використовується для спадково дрібнозернистих сталей, які зберігають після тривалої цементації зерно в серцевині і цементованому шарі не більше 7 балів. Ця технологія використовується після газової цементації, її головними перевагами є виключення повторного нагріву і зменшення деформації деталей.

Структура цементованого шару після термічної обробки – мартенсит відпущений, аустеніт залишковий, карбіди; структура серцевини – ферито-перлітна (вуглецеві сталі), маловуглецевий відпущений мартенсит з феритом (леговані сталі), що пояснюється підвищеною прогартуваністю легованих сталей. Після ХТО твердість поверхні цементованих сталей $HRC \geq 58$, серцевини $HRC 20 \dots 45$ (в залежності від хімічного складу сталі, розмірів деталі, структури серцевини).

Методи поверхневого зміцнення, зокрема цементация, підвищують границю втомленості. Руйнування виробів, зумовлене втомою металу, виникає під дією знакозмінного напруження. Тріщина втомленості зароджується і розвивається під дією розтягуючого напруження у зміцненому поверхневому шарі. Внаслідок взаємодії напруження навантаження і зміцнення зменшується рівень розтягуючого напруження і підвищується границя втомленості сталі і довговічність деталей.

Азотування – процес дифузійного насичення поверхні виробів азотом. Мета азотування – підвищити твердість, зносостійкість, границю втомленості та опір корозії.

У сплавах Fe–N утворюються такі фази:

α -фаза – твердий розчин впровадження азоту в Fe_α з ОЦК-гратками;

γ -фаза – твердий розчин впровадження N у Fe_γ з ГЦК-гратками;
 ϵ -фаза – твердий розчин на основі нітриду Fe_3N з ГЦУ-гратками.

Твердість нітрیدів заліза відносно невисока, твердість вуглецевих сталей після азотування не перевищує HV 600, тому для азотування використовують леговані Al-, V-, Cr-сталі. В останніх, окрім нітрідів AlN, VN, Cr₂N, для яких характерна висока твердість, є зони з підвищеним вмістом азоту і легуючих елементів, де виникають пружні викривлення ґраток α -твердого розчину. Високодисперсні нітриди легуючих елементів та збагачені азотом Al-, V-, Cr-зони гальмують рух дислокацій і підвищують твердість азотованого шару легованих сталей (HV 1000...1200).

Азотування конструкційних сталей проводиться при температурах нижче температури евтектоїдного перетворення в системі Fe–N (591 °C), для чого використовують середньовуглецеві (0,3...0,45 % C) леговані сталі 38Х2МЮА, 30Х2Н2МФА, 40ХНМ та ін. Перед азотуванням деталі проходять термічне поліпшення (гартування і високотемпературний відпуск) з метою забезпечення в'язкої серцевини і підготовки структури до азотування. Азотування при 520...560 °C дозволяє одержати шар товщиною 0,3...0,6 мм за 30...60 год. Атомарний азот для насичення утворюється при дисоціації аміаку $\text{NH}_3 \rightarrow \text{N} + 3\text{H}$.

Після насичення деталі охолоджуються в печі в атмосфері аміаку до 150...200 °C, а потім на повітрі. Висока твердість азотованого шару забезпечується утворенням твердого розчину проникнення азоту в Fe_α і, головним чином, нітридами легуючих елементів. Тому після азотування термічна обробка не виконується.

Азотування порівняно з цементацією має такі переваги: більша твердість поверхні, яка зберігається при нагріванні до 500 °C (твердість цементованих виробів знижується при нагріванні вище 200 °C); підвищені зносостійкість, границя втомленості, кавітаційна стійкість, опір корозії в повітряній атмосфері, прісній воді та її парі; незначна деформація виробів.

Недоліками азотування є низька швидкість насичення і підвищена крихкість азотованого шару.

Порядок виконання роботи

1. Циліндричні зразки діаметром 12...25 мм і висотою 10...20 мм, виготовлені зі сталі 10, 15, 20, 18ХГТ і т. п., піддають цементації у твердому карбюризаторі.

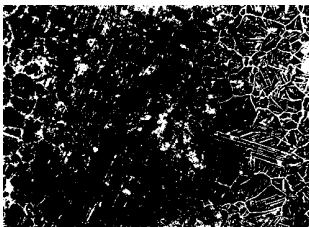
2. Процес здійснюють при температурі 910...950 °С протягом 6 год.

3. Зразки після повного охолодження на повітрі звільняють від карбюризатору і піддають гартуванню.

4. Відпуск зразків проводять при температурі 150...200 °С.

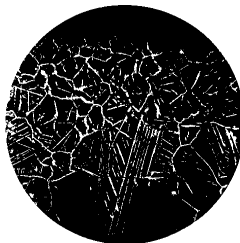
5. Заміряють твердість зразків до цементації, після цементації, гартування та відпуску.

6. Виготовляють мікросліпи та досліджують мікроструктуру цементовних шарів (рис. 5.1).



Сталь 10; x50

a



Сталь 10; x100

б



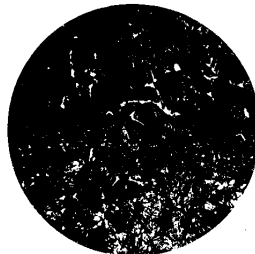
Сталь 185ХГТ; x400

в



Сталь 18ХГТ; x500

г



Сталь 18ХГТ; x500

д

Рис. 5.1. Зразки мікроструктур після цементації і термічної обробки:

a – цементований шар (без ТО); *б* – цементит у цементованому шарі (без ТО); *в* – аустеніт і мартенсит у цементованому шарі після ТО; *г* – структура серцевини – низьковуглецевий мартенсит (температура гартування 930 °С, температура відпалу 200 °С); *д* – ферит у серцевині, низьковуглецевий мартенсит (температура гартування 780 °С, температура відпалу 200 °С)

Порядок оформлення звіту

1. Коротко сформулювати мету роботи.
2. Описати суть і призначення ХТО, сталей, які використовують для цементації, технологію завершальної термічної обробки.
3. Схематично показати структуру цементованого шару (без ТО, після гартування).
4. Використовуючи дані про структуру та результати замірів твердості, пояснити зміни твердості поверхні зразку зі сталі 10 після цементації, гартування та низького відпуску.

Контрольні запитання

1. У чому полягає суть хіміко-термічної обробки?
2. Які переваги ХТО порівняно з іншими методами поверхневого зміцнення?
3. Який механізм процесу ХТО?
4. У чому полягає процес цементації?
5. Які деталі і з яких марок сталі піддають цементації?
6. Які є способи цементації?
7. Суть газової цементації.
8. Як обґрунтувати режим ТО після цементації?
9. Мікроструктура сталі після цементації.
10. Мікроструктура сталі після цементації і гартування.
11. Мікроструктура сталі після цементації, гартування і низького відпуску.
12. Які переваги азотованого шару у порівнянні з цементованим?
13. Чому азотуванню піддають леговані сталі?
14. Недоліки азотування.

Лабораторна робота № 6

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ КОЛЬОРОВИХ СПЛАВІВ

Мета роботи: дослідити структуру і ознайомитися з властивостями сплавів на основі міді, алюмінію, титану та легкоплавких підшипникових сплавів (бабітів).

Загальні відомості

Структура та властивості сплавів на основі міді

Сплави на основі міді поділяються на латуні та бронзи. *Латунями* називаються сплави міді з цинком. На рис. 6.1 наведена час-

тина діаграми стану системи Cu–Zn. Із цієї діаграми видно, що цинк розчиняється у міді в кількості до 39 %. Сплави, які утримують більш ніж 39 % цинку у структурі, крім α -фази мають надлишкову β -фазу, яка являє собою сполуку особливого типу CuZn.

Сплави, які мають від 39 до 46 % Zn, – двофазні, причому кількість β -фази зростає від нуля (39 % Zn) до 100 % (46 % Zn). Надлишкова β -фаза виявляється твердою та крихкою складовою. З урахуванням цього практичне застосування знайшли латуні, які містять не більше 43 % Zn.

Розрізняють прості та складні латуні. Прості складаються тільки з міді і цинку. Складні, крім міді і цинку, містять елементи, які додають з метою змінювання в потрібному напрямку властивостей сплаву.

Механічні властивості латуней змінюються при збільшенні кількості цинку (рис. 6.2). Вміст цинку більше 43 % приводить до різкого зниження пластичності і опірності латуней деформуванню у зв'язку зі значною кількістю у сплаві твердої та крихкої β -фази.

Однофазні латуні завдяки високій пластичності легко деформуються як у холодному, так і у гарячому стані. Використовуються вони переважно після холодної обробки тиском і подальшого відпалу для зняття наклепу. На рис. 6.3 показана структура однофазної латуні у литому стані. Тут спостерігається дендритна ліквіація. В процесі відпалу внаслідок ди-

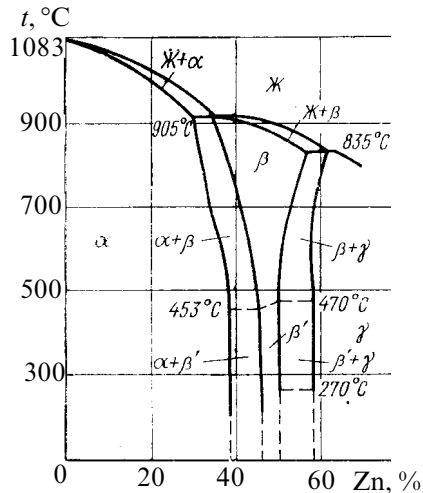


Рис. 6.1. Діаграма стану Cu–Zn

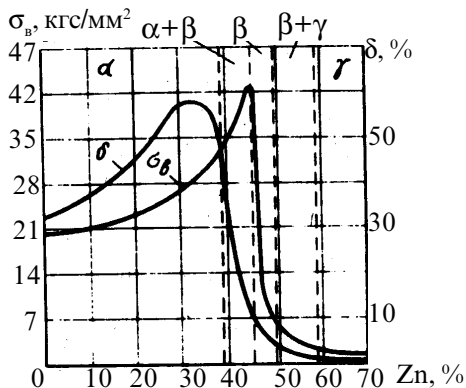
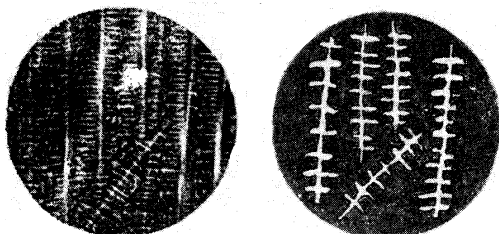


Рис. 6.2. Змінення механічних властивостей латуней у залежності від вмісту цинку

фузії склад сплаву вирівнюється і сплав набуває зернистої структури (рис. 6.4).

Необхідно пам'ятати, що однофазні латуні можуть виявляти схильність до корозійного розтріскування, що полягає в появленні з часом тріщин у виробі. Розтріскування проходить під дією агресивного середовища, головним чином аміаку, у випадку, коли латунь зазнала наклепу і на її поверхні виникли розтягальні залишкові напруження. Для запобігання розтріскуванню латунні вироби піддають відпалу при 250...300 °С для зменшення внутрішніх напруг.

Структура двофазної латуні у литому стані показана на рис. 6.5.



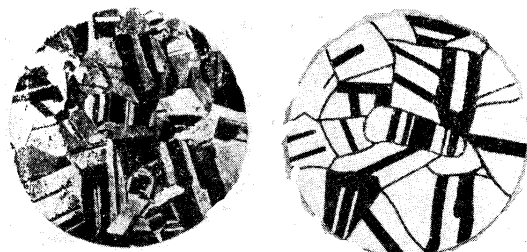
a

б

Рис. 6.3. Литя α -латунь з 30 % цинку:

a – мікроструктура, $\times 250$;

б – схема мікроструктури



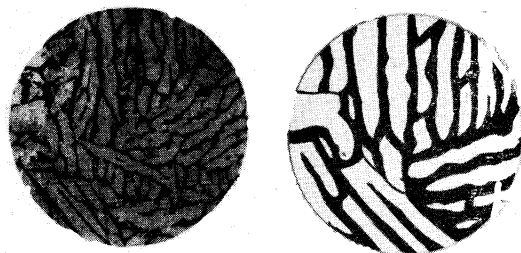
a

б

Рис. 6.4. Деформована і відпалена α -латунь:

a – мікроструктура, $\times 100$;

б – схема мікроструктури



a

б

Рис. 6.5. Литя $\alpha + \beta$ -латунь з 40 % цинку:

a – мікроструктура, $\times 150$;

б – схема мікроструктури

На практиці дуже часто використовують леговані латуні. Додатки олова надають високу опірність корозії у морській воді (латунь марки ЛО70-1). З метою поліпшення оброблюваності двофазної латуні до металу додають 1...2 % свинцю (латунь марки ЛС59-1). Додатки Fe, Mn, Al, Si збільшують міцнісні властивості. Ці елементи розчиняються у α - і β -фазах і самостійних структур не утворюють. Їх вплив проявляється в зміщенні на діаграмі Cu–Zn області існування α - і $\alpha+\beta$ -фаз до меншої концентрації цинку.

До бронз відносять сплави міді з будь-яким елементом, крім цинку. Найбільш широко застосовують олов'янисті та алюмінієві бронзи. Олово розчиняється у кристалічній ґратці міді, утворюючи твердий розчин α з найбільшою розчинністю 14 % (рис. 6.6). Тому олов'янисті бронзи, які містять до 14 % цинку, є однофазними (рис. 6.7). Збільшення кількості олова у структурі приводить до появи евтектоїду ($\alpha+\beta$), який завдяки фазі γ (Cu_3Zn_8) є твердою та крихкою складовою.

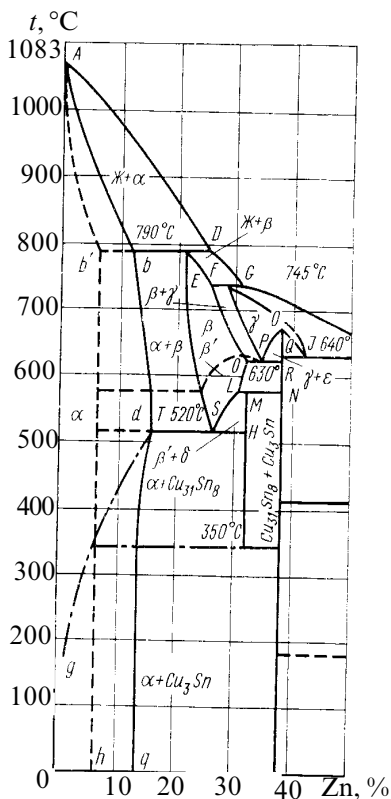
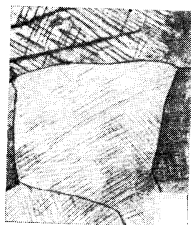
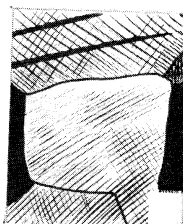


Рис. 6.6. Частина діаграми стану Cu–Sn



a



б

Рис. 6.7. Деформована і відпалена олов'яниста бронза з 6 % Sn:
a – мікроструктура, $\times 250$; *б* – схема мікроструктури

Але у зв'язку зі схильністю олов'янистих бронз до дендритної ліквідації ділянки евтектоїду у структурі литого сплаву спостерігаються вже при кількості олова більшій ніж 6 %. Характер змінювання механічних властивостей бронзи зі збільшенням кількості олова аналогічний змінюванню властивостей латуней при збільшенні кількості цинку.

Олов'яністі бронзи мають високі ливарні властивості. У судновому машинобудівництві вони застосовуються для литих складних деталей арматури, насосів, які працюють у морській воді, а також для деталей, які працюють на тертя. В останньому випадку використовуються бронзи у двофазному стані, оскільки підшипниковий сплав повинен мати неоднорідну структуру (м'яку основу, в яку вкраплені тверді складові). При роботі м'яка основа спрацьовується швидше, завдяки чому між частинками твердої фази утримується мастило. Як підшипникову найчастіше використовують бронзу Бр.ОФ10-1, яка містить 1 % фосфору. Він додається для посилення дендритної ліквідації. Додавання в олов'янисту бронзу цинку та нікелю також приводить до збільшення кількості евтектоїду. Ці елементи нових фаз не утворюють, оскільки знаходяться у твердому розчині.

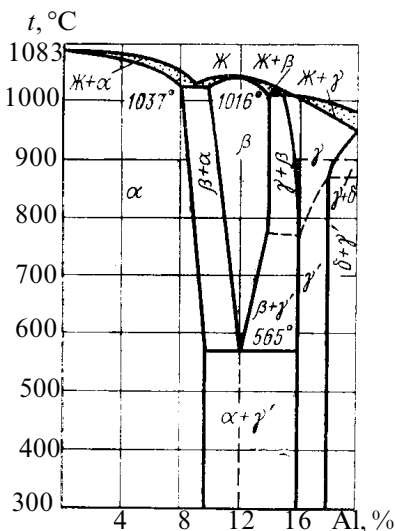


Рис. 6.8. Частина діаграми стану Cu-Sn

Алюмінієві бронзи, як і олов'яністі, бувають однофазні та двофазні. Гранична розчинність алюмінію у міді складає 9,8 % (рис. 6.8). При кількості алюмінію більше 9,8 % з'являється евтектоїд ($\alpha + \beta$) (рис. 6.9). Практичне застосування мають бронзи, які містять до 11 % алюмінію. З метою поліпшення механічних властивостей до алюмінієвих бронз додають Fe, Mn та Ni. У суднобудуванні алюмінієві бронзи використовують для виготовлення деталей, які працюють у морській воді (Бр.АМц9-2), арматури (Бр.АЖН9-4), гребних гвинтів (Бр.АЖН9-4-7) та ін.

Титан та його сплави

Інтенсивний розвиток виробництва титану та його сплавів пояс-

нюється сполученням таких цінних властивостей титану, як мала питома вага, велика питома міцність, відмінна корозійна стійкість, задовільна зварюваність, холодостійкість, висока стійкість проти сонячної радіації, немагнітність і ряд інших фізико-механічних характеристик.

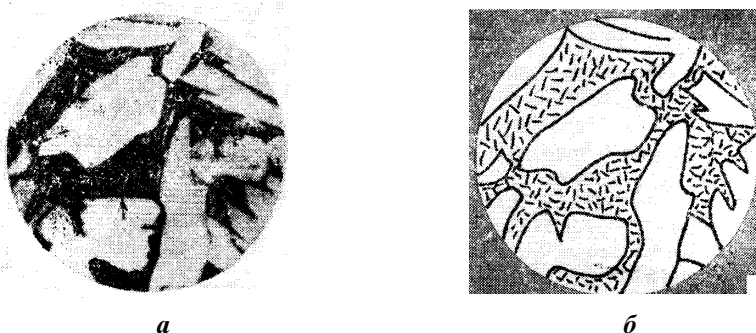


Рис. 6.9. Лита алюмінієва бронза:
а – мікроструктура, х500; б – схема мікроструктури

Титан – метал сріблясто-білого кольору, який має щільність $4,5 \text{ г/см}^3$. Температура плавлення становить $1668 \pm 4 \text{ }^\circ\text{C}$ у залежності від ступеня його чистоти.

Титан має дві поліморфні модифікації: α -титан з гексагональною щільно упакованою ґраткою і високотемпературну модифікацію β -титан з кубічною об'ємноцентричною ґраткою. Температура поліморфного $\alpha \rightarrow \beta$ -перетворення становить $882 \text{ }^\circ\text{C}$. Механічні властивості титану суттєво залежать від чистоти металу. Відрізняють домішки проникнення (кисень, азот, вуглець) і домішки змінування (залізо і кремній). Хоча домішки підвищують міцність, але одночасно різко знижують пластичність.

Технічно чистий титан марки ВТ-1 містить по масі не більше 0,30 % Fe; 0,12 % Si; 0,08 % C; 0,15 % O; 0,05 % N; 0,012 % H. За міцністю та пластичністю ВТ1-1 не поступається ряду вуглецевих та Cr–Ni-корозійностійких сталей: $\sigma_{\text{в}} = 450 \dots 600 \text{ МПа}$; $\delta_{0,2} = 380 \dots 500 \text{ МПа}$, $\delta \geq 25 \%$, $\psi \geq 50 \%$. При зниженні температури від кімнатної до криогенної міцнісні властивості зростають при збереженні високого рівня пластичності.

Титан має низький модуль пружності ($E = 112 \text{ ГПа}$), що усклад-

ное виготовлення жорстких конструкцій. Для підвищення жорсткості необхідно збільшувати товщину деталей та їх масу.

Завдяки стійкій пасивній плівці TiO_2 на поверхні титан та його сплави не кородують в атмосфері, прісній та морській воді, стійкі до ковітаційної корозії і корозії під напругою, а також до кислот органічного походження.

Виготовлення виробів з титану та його сплавів має ряд технологічних особливостей. Завдяки високій хімічній активності рідкого титану його виплавку, розливку та дугову зварку проводять у вакуумі або атмосфері інертних газів.

Різні елементи за характером впливу на алотропічне перетворення титану можуть бути розділені на дві основні групи:

стабілізатори α -фази (Al, C, N, O), додаток яких до титану викликає підвищення температури алотропічного перетворення і, як наслідок, розширення області існування α -фази;

стабілізатори β -фази (Mo, Fe, Cr, Mn, V), які розширюють зони існування β -фази.

У зв'язку з цим розрізняють однофазні α - або β -титанові сплави і двофазні сплави, в яких одночасно присутні α - і β -фази. Найбільш широко застосовують α - та $\alpha+\beta$ -сплави. Титан та його сплави зберігають досить добрі властивості при підвищених температурах.

З метою поліпшення механічних властивостей α -титанових сплавів їх додатково легують невеликою кількістю Sn, Zn і Mn. Додавання олова викликає збільшення ударної в'язкості, підвищує жароміцність та технологічні властивості. Вироби зі сплаву ВТ5-1 можуть тривалий час працювати при температурах до 500 °С і короткочасно, протягом декількох хвилин, при температурах до 900 °С.

Додавання марганцю (ВТ4-1, ВТ4-2) підвищує тепломіцність і зварюваність. З огляду на відсутність алотропічних перетворень, α -титанові сплави не можуть зміцнюватися за допомогою термічної обробки.

До складу двофазних сплавів крім α - входять β -стабілізатори. Сплави цього типу добре обробляються тиском, мають високу міцність при кімнатній та підвищених температурах, можуть зміцнюватися за допомогою термічної обробки, але зварюються гірше, ніж однофазні. Типовим представником цих сплавів є сплав марки ВТ3-1, структура якого після різної термічної обробки показана на рис. 6.10 – 6.12.

Рис. 6.10. Титановий сплав

BT3-1 після відпалу:

a – мікроструктура, x500;

б – схема мікроструктури

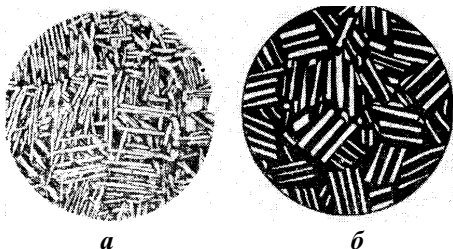


Рис. 6.11. Титановий сплав

BT3-1 після гартування:

a – мікроструктура, x500;

б – схема мікроструктури

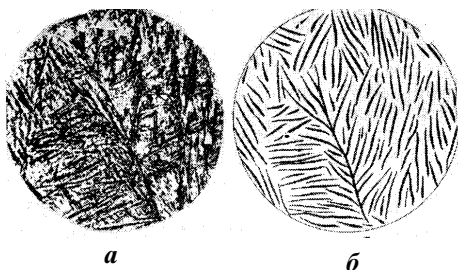
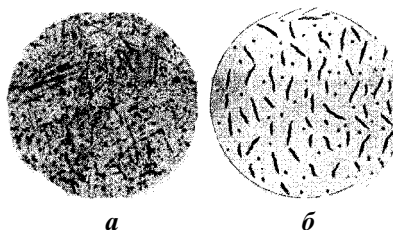


Рис. 6.12. Титановий сплав BT3-1

після гартування і старіння:

a – мікроструктура, x250;

б – схема мікроструктури



Сплави на основі алюмінію

Алюмінієві сплави поділяються на ливарні (силуміни), деформівні (дюралюміни) й алюмінієво-магнієві.

Силуміни, в залежності від місткості кремнію, поділяються на низькокрем'янисті (4...10 % Si) та високкремністі (10...13 % Si).

Алюміній і кремній утворюють евтектику, яка містить 11,7 % Al (рис. 6.13). Таким чином, високкремністі силуміни є сплавами евтектичними або заевтектичними. У рівноважному стані їх структура являє собою грубу евтектику, в якій розташовуються кристали первинного кремнію (рис. 6.14). З огляду на відсутність перетворень у твердому стані, підвищення міцності високкремністих силумінів шляхом термічної обробки неможливе. Суттєве зміц-

нення силумінів досягається модифікуванням, тобто введенням у рідкий метал спеціальних додатків модифікаторів. Як модифікатори застосовують суміші солей NaF і NaCl у кількості 2...3 % від маси.

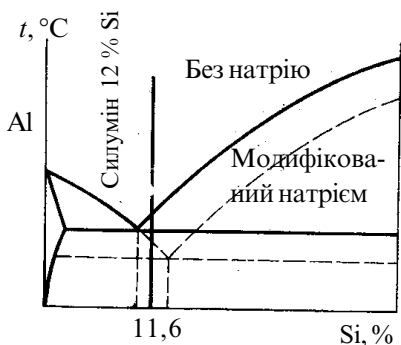
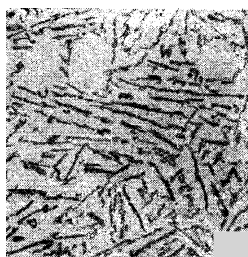


Рис. 6.13. Діаграма стану Al–Si (штриховою лінією показано зміщення ліній після введення модифікатора)



a



б

Рис. 6.14. Силумін АЛ2:

a – мікроструктура; *б* – схема мікроструктури

Під впливом модифікаторів сплав стає доєвтектичним і його структура складається з дрібнозернистої евтектики і первинних кристалів алюмінію (рис. 6.15). Здрібнення структури крихких включень кремнію приводить до підвищення межі міцності на 30...40 %, а подовження зростає в 2...3 рази.

З огляду на порівняно низькі механічні характеристики, але добрі ливарні властивості, силумін марки АЛ2 звичайно використовується для відливок складної форми, від яких не вимагається високих механічних властивостей.

Низькокрем'яністі силуміни марок АЛ3, АЛ4, АЛ5, АЛ9 містять кремній від 4 до 10 % і піддаються термічній обробці, яка складається із гартування з температури 520...530 °С і подальшого старіння протягом 10...20 год при температурі 150...180 °С.

Після термічної обробки низькокрем'янисті силуміни мають $\sigma_B = 200 \dots 250$ МПа і $\delta = 1 \dots 6$ %.

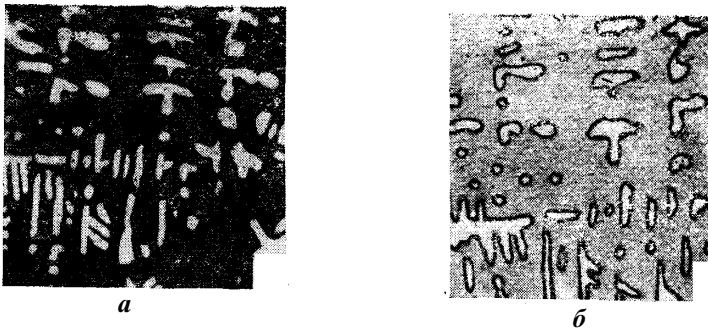


Рис. 6.15. Силумін АЛ2 модифікований:
а – мікроструктура, $\times 200$; *б* – схема мікроструктури

Низькокрем'янисті силуміни містять, крім кремнію, в невеликих кількостях Mg, Mn і Cu. Ці елементи дещо підвищують міцність, але суттєво знижують ливарні властивості сплавів.

У суднобудуванні широкого розповсюдження набули алюмінієво-магнієві сплави, оскільки поряд з малою питомою вагою вони мають підвищену корозійну стійкість у морській воді, добру зварюваність, нехолодноламкі. Але вони мають ряд суттєвих недоліків: невисоку міцність, підвищення якої можливе тільки за рахунок наклепу; низький модуль пружності (70...75 ГПа); при контакті зі сталлю утворюють електрохімічну пару, що призводить до інтенсивної корозії.

Типовим представником конструкційних алюмінієво-магнієвих сплавів є марки АМг5 і АМг6, які застосовуються для виготовлення обшивки і набору корпусів невеликих суден, надбудов, легких перебірок, а також для деталей корпусу судна, які не стикаються з морською водою.

У ряді випадків для поліпшення зварюваності до цих сплавів додають невеликі кількості ванадію або титану. Міцність цих сплавів значно зростає при ступенях деформування до 5 %.

Легкоплавкі підшипникові сплави (бабіти)

Спеціальні підшипникові сплави – *бабіти* – являють собою сплави олова або свинцю з сурмою, міддю, а у ряді випадків – з лужноземельними металами.

Ці сплави мають низький коефіцієнт тертя зі сталлю, добре припрацьовуються до валу і легко утримують мастило. Завдяки в'язкій основі вони легко поглинають сторонні тверді частинки, не утворюючи задирок валу.

Найкращі антифрикційні та механічні властивості мають олов'янисті бабіти. Бабіт марки Б83 містить 83 % Sn; 11 % Sb і 6 % Cu. Структура цього сплаву складається з м'якої основи, яка являє собою розчин невеликої кількості Cu і Sb в олові, та твердих включень SnSb і Cu_3Sn . Включення SnSb мають форму великих багатокутників, а Cu_3Sn – дрібних голок (рис. 6.16).

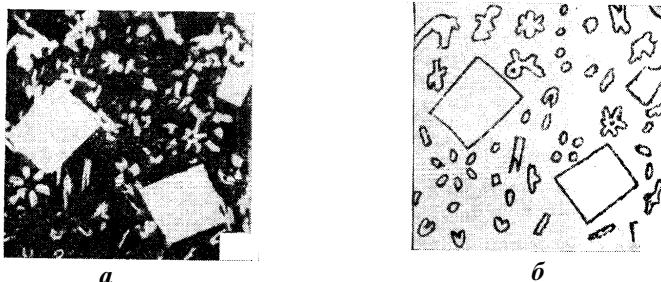


Рис. 6.16. Олов'янистий бабіт Б83:

a – мікроструктура, $\times 100$; *б* – схема мікроструктури

Олов'янисті бабіти порівняно дорогі, тому у ряді випадків доцільно застосувати більш дешеві, але менш якісні сплави на основі свинцю. Серед свинцевистих бабітів широкого розповсюдження набув сплав марки Б6, який крім свинцю містить 5...6 % Sn; 14...16 % Sb і 2,3...3 % Cu. Структура цього сплаву складається з м'якої основи та твердих включень SnSb і Cu_3Sn .

До групи лужноземельних сплавів відносяться бабіт марки БК, який містить 0,85...1,5 % кальцію і 0,6...0,9 % натрію, а також свинець. Свинцевисті бабіти порівняно з олов'янистими мають меншу міцність і опір зносу, тому їх слід використовувати для навантажених підшипників менш відповідального призначення.

Матеріали, зразки та прилади: мікроскоп МІМ-7, зразки шліфів кольорових сплавів.

Порядок виконання роботи

1. Дослідити під мікроскопом та описати мікроструктуру заданих зразків кольорових сплавів.

2. Схематично зобразити кожен структуру.

Порядок оформлення звіту

1. Коротко сформулювати мету роботи.
2. Навести дані про склад, структуру, властивості і застосування кольорових сплавів.
3. Представити схеми мікроструктур.

Контрольні питання

1. Які сплави відносяться до латуней і бронз?
2. Чому на практиці не використовують латуні з місткістю цинку більше 43 % і алюмінієві бронзи з місткістю алюмінію більше 11 %?
3. Які особливі властивості мають бронзи?
4. Як класифікуються титанові сплави в залежності від впливу легуючих додатків на поліморфне перетворення титану?
5. Як класифікуються алюмінієві сплави? Де вони застосовуються?
6. Які переваги та недоліки мають титан і сплави на його основі?
7. Охарактеризуйте структуру сплавів, які використовуються для підшипників.

Лабораторна робота № 7

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ПОЛІМЕРІВ

Мета роботи: ознайомитися із загальними характеристиками синтетичних полімерних матеріалів і пластмас на їх основі та їх властивостями; дослідити вплив температури на твердість оргскла.

Загальні відомості

Неметалеві матеріали як конструкційні матеріали є важливим доповненням до металів, у ряді випадків з успіхом замінюють їх, а інколи неметалічні матеріали самі стають незамінними.

Позитивною якістю неметалічних матеріалів є сполучення необхідного рівня хімічних, фізичних та механічних властивостей з низькою вартістю і високою технологічністю при виготовленні виробів складної конфігурації. Трудомісткість при виготовленні

виробів з неметалевих матеріалів у 5–6 разів нижча, і вони в 4–5 разів дешевші, ніж металеві. У зв'язку з цим безперервно зростає використання неметалевих матеріалів.

Склад і будова полімерів

В основі неметалевих матеріалів лежать полімери. *Полімерами* називаються високомолекулярні хімічні сполуки, які складаються з численних маломолекулярних ланок (мономерів). Макромолекули являють собою довгі ланцюги з мономерів, що визначає їх велику гнучкість. Окремі атоми в мономерах з'єднані між собою міцними ковалентними хімічними зв'язками. Між макромолекулами полімерів діють значно слабші фізичні зв'язки.

Особливістю молекул полімерів є їх велика молекулярна маса ($m \geq 5 \cdot 10^3$). Сполуки з меншою молекулярною масою ($m = 5000 \dots 500$) називаються олігомерами, у низькомолекулярних сполук $m \leq 500$. Це розподілення за молекулярною масою умовне.

При великих розмірах макромолекул властивості речовини залежать не тільки від хімічних властивостей молекул, а також від їх взаємного розташування і будови.

Якщо основний ланцюг побудований з однакових атомів, то полімер називається гомоланцюговим, а якщо з різних – гетероланцюговим. Для високомолекулярних сполук характерна відсутність газоподібного стану.

Розрізняють полімери природні та штучні (або синтетичні). До *природних* полімерів належать: натуральний каучук, целюлоза, слюда, азбест, шерсть. Проте чільне місце займають *синтетичні* полімери, які одержують у процесі хімічного синтезу із низькомолекулярних сполук.

Усі полімери поділяються на органічні, елементоорганічні і неорганічні.

Органічні полімери складаються з атомів вуглецю, водню, сірки та галогенів.

Елементоорганічні містять у складі основного ланцюга, крім перелічених, атоми кремнію, титану, алюмінію. В природі таких з'єднань не існує. Це синтетичні полімери.

Неорганічні полімери не містять атомів вуглецю. Їх основою є оксиди кремнію, алюмінію, магнію.

Для отримання матеріалів з заданими властивостями у техніці часто використовують не окремі полімери, а їх сполучення з іншими матеріалами.

Своєрідність властивостей полімерів обумовлена їх структурою. Розрізняють такі типи полімерних структур: лінійна, лінійно-розгалужена, драбинчаста, просторова (рис. 7.1).

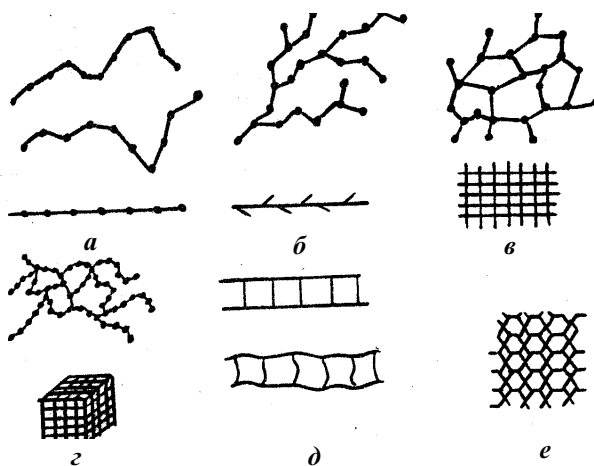


Рис. 7.1. Форма макромолекул полімерів:
 а – лінійна; б – розгалужена; в – сітчаста; г – просторова;
 д – драбинчаста; е – паркетна

За фазовим складом полімери становлять собою систему, яка складається з кристалічних та аморфних областей. Кристалічна форма полімерів сприяє підвищенню їх твердості, міцності, модуля пружності та інших механічних характеристик, одночасно знижує гнучкість молекул. Аморфна фаза зменшує жорсткість, що робить полімер більш еластичним, тобто здатним до великих оборотних деформацій.

Відношення об'єму всіх кристалічних областей до загального об'єму називається *ступенем кристалічності*. Високий ступінь кристалічності (60...80 %) мають фторопласти, поліпропілен, поліетилен високої щільності. Менший ступінь кристалічності мають полівінілхлорид, поліетилен низької щільності.

У залежності від того, як полімери поведуться при нагріванні, вони поділяються на термопластичні і термореактивні. *Термопластичні* полімери при нагріванні розм'якшуються і плавляться, а при охолодженні твердіють, що робить процес плавлення і твердіння цілком оборотним. Термопластичні полімери мають лінійну

або лінійно-розгалужену структуру макромолекул. До термопластів відносять поліетилен, полістирол, поліаміди. Вироби з термопластичних полімерів виготовляють литтям під тиском у водоохолоджувану форму, пресуванням, видуванням та іншими методами.

Термореактивні полімери спочатку мають лінійну структуру і при нагріванні зм'якшуються, потім внаслідок протікання хімічних реакцій набувають просторової структури і перетворюються на тверду речовину, зберігаючи надалі високу твердість. Подальше нагрівання не розм'якшує, а приводить тільки до їх розкладання. Готовий термореактивний полімер не плавиться і, на відміну від термопластичного, його не можна перероблювати повторно. До термореактивних полімерів належать феноло-формальдегідна, епоксидна та інші смоли.

Основні властивості полімерів

Полімери можуть знаходитися у твердому і рідкому станах, кристалічному й аморфному фазових станах, а також у високоеластичному і в'язкоплинному деформаційних фізичних станах.

Полімери мають високу стійкість у таких середовищах, як луги та концентровані кислоти. На відміну від металів, вони не схильні до електрохімічної корозії. З підвищенням молекулярної маси знижується розчинність полімерів у розчинах органічного походження, а полімери з просторовою структурою практично не схильні до дії органічних розчинів.

Більшість полімерів є діелектриками і в основному належить до немагнітних матеріалів. Серед всіх застосовуваних конструкційних матеріалів полімери мають найменшу теплопровідність та найбільшу теплову усадку і теплоємність. Теплова усадка полімерів у 10...20 разів більша, ніж теплова усадка металів.

Полімери мають широкий діапазон механічних характеристик, які суттєво залежать від їх структури. Крім структурних параметрів, великий вплив на механічні властивості мають зовнішні фактори: температура, тривалість та частота або швидкість навантаження, вид напруженого стану, термообробка, температура навколишнього середовища.

Особливостями механічних властивостей полімерів є їх задовільна міцність, але мала жорсткість у порівнянні з металевими матеріалами.

Полімерні матеріали поділяються на тверді з модулем пруж-

ності $E = 1...10$ ГПа (пластмаси, волокна, плівки) і м'які – високо-еластичні матеріали з модулем пружності $E = 1...10$ МПа (гумки). Для полімерів характерна яскраво виявлена анізотропія властивостей, зниження міцності при тривалому нагріванні. Разом з цим полімери мають високий утомлений опір.

Однією з основних характеристик полімерів є їх деформованість. Значення деформованості визначають методом термомеханічних кривих "Деформація – температура" (рис. 7.2).

На цьому графіку $T_c - T_n$ – температури склування і початку в'язкої плинності; I, II, III – ділянки склоподібного високопластичного і в'язкоплинного станів. T_c – перша точка перегину, початок переходу з твердого склоподібного стану у в'язкоплинний, називається температурою склування; T_n – друга точка перегину, температура плинності. Інтервал $T_c - T_n$ називається інтервалом зм'якшення. В цьому інтервалі речовина знаходиться у високопластичному стані, що характерний тільки для полімерних матеріалів і є проміжним між склоподібним і в'язкоплинним.

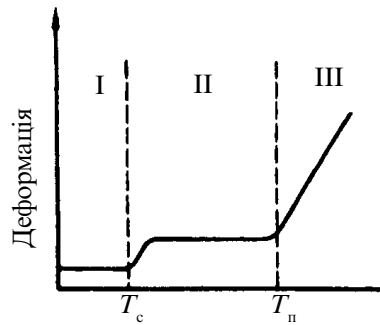


Рис. 7.2. Термомеханічна крива аморфного полімера з лінійною структурою

Властивості деяких полімерів наведені у табл. 7.1.

Таблиця. 7.1. Властивості деяких полімерів

Полімер	Щільність, г/см ³	E при 20 °С, ГПа	σ , МПа	Тріщино-стійкість К при 20 °С, МПа·м ^{1/2}	Повне подовження ϵ , %	T_c , °С
Термопластичні						
Поліетилен (малої щільності)	0,92	0,15...0,24	7...17	1...2	90...800	0
Поліетилен (високої щільності)	0,96	0,55...1,0	20...37	2...5	15...100	30
Полівінілхлорид	1,39	2,4...3,0	40...60	2,4	2...30	80
Поліпропілен	0,9	1,2...1,7	50...70	3,5	10...700	-20
Полістирол	1,06	3,0...3,3	35...68	2	1...2	100
Поліамід	1,14	2,0...3,5	60...110	3...5	60	70

Продовж. табл. 7.1

Полімер	Щільність, г/см ³	E при 20 °С, ГПа	σ, МПа	Тріщино- стійкість K при 20 °С, МПа·м ^{1/2}	Повне подов- ження ε, %	T _c , °С
Термореактивні						
Феноло-формальде- гідна смола	1,4	8	35...55	—	0	—
Поліестр	—	1,3...4,5	45...8	0,5	0	70
Епоксидна смола	1,6	2,1...5,5	40...85	0,6...1,0	0	80

Пластичні маси

Загальна характеристика пластмас. Пластмаси – це синтетичні матеріали, які одержують на основі органічних та елементоорганічних полімерів. Пластмаси складаються з декількох компонентів: в'язучої речовини, наповнювача, пластифікатора та інших. Обов'язковим компонентом є в'язуча речовина.

Наповнювачем є тверді матеріали органічного і неорганічного походження, які надають пластмасам твердість, міцність, а також деякі спеціальні властивості.

Пластифікатори являють собою нелеткі рідини з низькою температурою твердіння. Їх додають з метою поширення температурного інтервалу високопластичного стану, зниження жорсткості пластмас і температури крихкості.

До складу пластмас можуть також входити стабілізатори, барвники та інші речовини.

Термопластичні пластмаси (термопласти)

Найбільш застосовувані серед всіх видів термопластів – пластмаси на основі поліетилену, поліпропілену, полістиролу, полівінілхлориду, фторопластів, поліамідів.

Поліетилен – продукт полімерізації етилену, одержаного з нафтових газів. Структура полікристалічна. Має високу еластичність при температурі до 70 °С, високі діелектричні характеристики, водо- та хімічно стійкий. Не містить у своєму складі шкідливих речовин. Механічні властивості поліетилену суттєво залежать від температури: з підвищенням температури вони знижуються, а при температурі 50 °С і вище поліетилен зм'якшується і переходить у стан плинності. При температурі 0 °С підвищується міцність полімеру, але значно знижується його пластичність. При температурі нижче –60 °С він переходить у крихкий стан.

Недоліком поліетилену як конструкційного матеріалу є висока повзучість.

Органічне скло – продукт полімеризації складних ефірів акрилової і метаакрилової кислот. Органічне листове скло в два рази легше за мінеральне. Прозоре, пропускає 75 % ультрафіолетових променів, світло- і морозостійке, склеюється, обробляється різанням. При температурі 80 °С органічне скло починає зм'якшуватися, при 105...154 °С з'являється пластичність, що дозволяє формувати з нього різні деталі. Механічні властивості органічного скла залежать від температури. Критерієм, який визначає придатність для експлуатації, є не тільки їх прозорість, але і поява на поверхні і в середині дрібних тріщин "срібла". Цей дефект знижує прозорість і міцність скла. Причиною появи "срібла" є внутрішні напруги, які виникають у зв'язку з низькою теплопровідністю і високим коефіцієнтом лінійного поширення матеріалу. Органічне скло стійке до дії розбавлених кислот та лугів. Застосовується для осклювання, виготовлення деталей сантехніки, оптичних лінз і т.д. Недоліком є невисока поверхнева твердість.

Фторопласти – полімери фторпохідних етиленового ряду. Фторопласти мають міцність при розтягненні 15...35 МПа, при вигинанні 10...15 МПа, відносно подовження 250...300 %.

Найбільш розповсюдженим є фторопласт-4, або політетрафторетилен (тефлон). Він характеризується високою щільністю (2,1...2,3 г/см³), термо- і морозостійкістю. Інтервал робочих температур при експлуатації виробів з фторопласту-4 становить від -269 до +260 °С. Плівка з нього не стає крихкою навіть у середовищі рідкого гелію. Фторопласт-4 має добрі діелектричні властивості і високу корозійну стійкість; за хімічною стійкістю перевершує всі відомі матеріали, у тому числі золото і платину; стійкий до впливу всіх мінеральних і органічних лугів, кислот, органічних розчинників; не набухає у воді; не змочується рідинами.

Фторопласт-4 має низький коефіцієнт тертя і застосовується для виготовлення підшипників ковзання без мастила. Для зменшення спрацювання підшипників до фторопласту додають 15...30 % наповнювача (графіту, скляного волокна). Фторопласти широко застосовуються в електро- і радіотехнічній промисловості, а також для виготовлення хімічно стійких труб, кранів, мембран, насосів та деталей медичної техніки.

Поліуретани – найбільш цінні і розповсюджені термопластич-

ні полімери. Вони характеризуються високим модулем пружності, зносостійкістю, високим коефіцієнтом в'язкості, стійкістю до вібрацій, до дії мастил, бензину, а також атмосферостійкістю. Поліуретани можуть працювати при температурі до -70°C .

Полікарбонати – термопластичні полімери на основі дифенілпропану, які випускаються під назвою "дифлон". Характеризуються низьким водопоглинанням і газопроникністю, добрими діелектричними властивостями, високою жорсткістю, тепло- і хімічною стійкістю, не мають запаху і смаку, фізіологічно нешкідливі, прозорі, добре фарбуються. Стійкі до дії окиснювачів при нагріванні до 120°C .

Дифлон – один з найбільш удароміцних термопластів. Це дозволяє використовувати його як конструкційний матеріал, який замінює метали. З полікарбонату виготовляють шестерні, підшипники, корпуси, кришки та інші деталі. Фізико-механічні властивості поліпшуються при введенні армуючих волокон.

Обладнання та матеріали: зразок оргскла, прес Брінеля, термометр.

Порядок виконання роботи

Експериментально перевірити вплив нагрівання на твердість пластмас.

1. Нагріти зразки оргскла або іншої пластмаси до температур 50, 75, 100°C у воді.

2. Замірити їх твердість на пресі Брінеля при навантаженні 1000 кг кулькою $d = 10$ мм.

3. Отримані дані занести до табл. 7.2.

4. За отриманими даними побудувати графік.

Таблиця 7.2. Твердість пластмас у залежності від температури нагріву

Матеріал	Товщина	Твердість після нагрівання, $^{\circ}\text{C}$			
		20	50	70	100

Порядок оформлення звіту

1. Коротко сформулювати мету роботи.

2. Навести дані про склад, будову, властивості полімерів, а також про властивості та застосування пластмас на їх основі.

3. Одержані експериментальні дані занести до табл. 7.2.
4. Обґрунтувати одержані дані.

Контрольні питання

1. Які матеріали називаються полімерами?
2. Назвіть типи полімерних структур.
3. Який фазовий склад мають полімери?
4. Які полімери є термопластичними, а які – термореактивними?
5. Назвіть особливості механічних властивостей полімерів у порівнянні зі сталями.
6. З яких компонентів складаються пластмаси?
7. Які пластмаси найчастіше використовуються і які властивості вони мають?

Зміст

<i>Лабораторна робота № 1. Дослідження структури та вла- стивостей чавунів</i>	<i>3</i>
<i>Лабораторна робота № 2. Дослідження мікроструктури зварних з'єднань</i>	<i>9</i>
<i>Лабораторна робота № 3. Дослідження загартовуваності та прогартовуваності вуглецевих і легованих сталей.....</i>	<i>15</i>
<i>Лабораторна робота № 4. Термічна обробка зварних з'єд- нань</i>	<i>23</i>
<i>Лабораторна робота № 5. Вплив хіміко-термічної обробки на структуру і властивості поверхневого шару виробів зі сталей.....</i>	<i>39</i>
<i>Лабораторна робота № 6. Дослідження структури кольоро- вих сплавів</i>	<i>46</i>
<i>Лабораторна робота № 7. Дослідження властивостей мате- ріалів на основі полімерів</i>	<i>57</i>

ДУБОВИЙ Олександр Миколайович
ЛЕБЕДЄВА Наталія Юріївна

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт з дисципліни

"Матеріалознавство і термічна обробка металів та зварних з'єднань"

Видавництво УДМТУ, 54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 1150 від 12.12.2002 р.

Редактор О.Є. Вакула
Комп'ютерна правка та верстка А.Й. Тріщ
Коректор Н.О. Шайкіна

Підписано до друку 26.02.03. Формат 60×84/16. Папір офсетний.
Ум. друк. арк. 3,8. Обл.-вид. арк. 4,1. Тираж 300 прим.
Вид. № 36. Зам. № 237. Ціна договірна.



ВИДАВНИЦТВО УКРАЇНСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО МОРСЬКОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ



Шановні панове!

Запрошуємо Вас ознайомитись з можливостями книжкового видавництва, висококваліфіковані спеціалісти якого забезпечать оперативне та якісне виконання замовлення будь-якого рівня складності.

Наш головний принцип – задовольнити потреби замовника в повному комплексі поліграфічних послуг, починаючи з розробки та підготовки оригіналу-макета, що виконується на базі IBM PC, і закінчуючи друком на офсетних машинах.

Крім цього, ми маємо повний комплекс післядрукарського обслуговування, що дає можливість виконувати:

- ✓ аркушепідбір;
- ✓ брошурування на скобу, клей;
- ✓ порізку на гільйотинах;
- ✓ ламінування.

Видавництво також оснащено сучасним цифровим дублюатором фірми "Duplo" формату А3, що дає можливість тиражувати зі швидкістю до 130 копій за хвилину.

Для постійних клієнтів – гнучка система знижок.

Отже, якщо вам потрібно надрукувати **підручники, книги, брошури, журнали, каталоги, рекламні листівки, прайс-листи, бланки, візитні картки**, – ми до Ваших послуг.

© Український державний морський технічний університет

✉ Україна, 54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5,
видавництво УДМТУ

☎ 8(0512) 37-33-42; 39-81-46, 39-73-39, fax 8(0512) 39-73-26;

E-mail: publishing@usmtu.edu.ua