

О. А. КУЗІН, Р. А. ЯЦЮК

---

# МЕТАЛОЗНАВСТВО ТА ТЕРМІЧНА ОБРОБКА МЕТАЛІВ

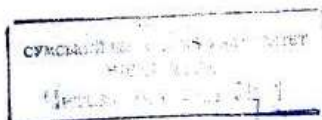
Підручник

394413

105



Львів  
Афіша  
2002



ББК 34.2 +34.651

К 89

УДК 669.017 + 621.78

Рецензенти:

*О. М. Романів*

д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАН України,  
голова Наук. т-ва ім. Шевченка;

*С. Є. Кондратюк*

д-р техн. наук, проф.,  
Фізико-техн. ін-т металів і сплавів  
НАН України, м. Київ

ISBN 966-7760-36-7

© О. А. Кузін, Р. А. Яцюк, 2002  
© ПТВФ «Афіша», 2002

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| Передмова .....  | 9  |
| Вступ .....  | 11 |
| <b>Частина I. МЕТАЛОЗНАВСТВО</b> .....   | 19 |
| <b>Розділ 1. Metали. Класифікація, властивості і методи дослідження</b> .....                        | 19 |
| 1.1. Властивості металів і сплавів .....   | 20 |
| Фізичні властивості .....  | 20 |
| Механічні властивості .....  | 23 |
| Технологічні властивості .....   | 25 |
| Хімічні властивості .....  | 26 |
| Експлуатаційні (спеціальні) властивості .....  | 26 |
| 1.2. Методи дослідження і випробування матеріалів .....  | 26 |
| Фізичні дослідження .....  | 26 |
| Структурні дослідження .....   | 28 |
| Методи визначення механічних властивостей металів .....  | 31 |
| <b>Розділ 2. Будова металів</b> .....  | 38 |
| 2.1. Особливості будови в рідкому стані .....  | 38 |
| 2.2. Кристалізація металів .....   | 38 |
| 2.3. Атомно-кристалічна будова металів .....   | 44 |
| <b>Розділ 3. Пластична деформація і рекристалізація металів</b> .....                                | 52 |
| 3.1. Види напружень .....  | 52 |
| 3.2. Пружна і пластична деформації .....   | 52 |
| Механізм пластичної деформації .....   | 53 |
| 3.3. Вплив нагрівання на структуру і властивості zdeформованого металу .....                         | 55 |
| Повернення і полігонізація .....   | 55 |
| Рекристалізація (утворення нових зерен) .....  | 56 |
| Холодна і гаряча деформації .....  | 57 |
| <b>Розділ 4. Руйнування металів</b> .....  | 58 |
| <b>Розділ 5. Теорія сплавів</b> .....  | 64 |
| 5.1. Характеристика фаз у сплавах .....  | 64 |
| 5.2. Діаграми стану сплавів .....  | 66 |
| Методика побудови діаграм стану .....  | 66 |
| Діаграми стану подвійних сплавів, що утворюють механічні суміші із чистих компонентів (I роду) ..... | 68 |
| Діаграма стану сплавів, що утворюють необмежені тверді розчини (II роду) .....                       | 71 |
| Діаграма стану сплавів, що утворюють обмежені тверді розчини (III роду) .....                        | 72 |
| Діаграма стану сплавів, що утворюють хімічні сполуки (IV роду) .....                                 | 73 |
| Зв'язок між властивостями сплавів і типом діаграм стану .....  | 74 |
| Діаграми стану потрійних сплавів .....   | 76 |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Розділ 6. Залізовуглецеві сплави</b>                               | <b>78</b>  |
| 6.1. Компоненти і фази залізовуглецевих сплавів                       | 78         |
| Залізо та його сполуки з вуглецем                                     | 78         |
| Діаграма стану системи залізо — цементит                              | 79         |
| Критичні точки у залізовуглецевих сплавах                             | 83         |
| 6.2. Вуглецеві сталі  | 84         |
| Вплив вуглецю на властивості сталі                                    | 84         |
| Класифікація вуглецевих сталей  | 86         |
| 6.3. Чавуни   | 89         |
| Різновидності чавунів   | 91         |
| Процес графітизації чавунів   | 92         |
| Мікроструктура і властивості чавунів                                  | 93         |
| 6.4. Леговані сталі   | 100        |
| Вплив легуючих елементів на перетворення і властивості сталі          | 100        |
| Карбіди в легованих сталях  | 102        |
| Класифікація і маркування легованих сталей                            | 103        |
| <b>Розділ 7. Конструкційні сталі</b>                                  | <b>106</b> |
| Автоматні сталі   | 106        |
| Будівельні сталі  | 107        |
| Сталі, що цементуються  | 108        |
| Сталі, що поліпшуються  | 110        |
| Високоміцні сталі   | 111        |
| Пружинно-ресорні сталі  | 113        |
| Підшипникові сталі  | 114        |
| Зносостійкі сталі   | 115        |
| <b>Розділ 8. Інструментальні сталі і сплави</b>                       | <b>116</b> |
| 8.1. Сталі і сплави для різального інструменту                        | 116        |
| Вуглецеві сталі   | 117        |
| Леговані сталі  | 118        |
| Швидкорізальні сталі  | 119        |
| Металокерамічні тверді сплави   | 121        |
| Сталі та сплави для деревообробного інструменту                       | 123        |
| 8.2. Сталі для вимірювального інструменту                             | 125        |
| 8.3. Штампові сталі   | 125        |
| Сталі для штампів холодного деформування                              | 126        |
| Сталі для штампів гарячого деформування                               | 127        |
| <b>Розділ 9. Сталі та сплави з особливими фізичними властивостями</b> | <b>129</b> |
| 9.1. Магнітні сталі та сплави   | 129        |
| Магнітотверді сталі та сплави   | 130        |
| Магнітом'які сталі та сплави  | 130        |
| 9.2. Сплави із заданим коефіцієнтом теплового розширення              | 131        |
| 9.3. Сплави з високим електричним опором                              | 132        |
| <b>Розділ 10. Порошкові сплави</b>                                    | <b>133</b> |



|  |     |
|--|-----|
| Виробництво порошкових сплавів .....                                 | 133 |
| Застосування порошкових сплавів .....                                | 134 |
| <b>Розділ 11. Кольорові метали і сплави:</b> .....                   | 135 |
| Алюміній та його сплави .....  | 135 |
| Магній та його сплави .....  | 138 |
| Титан та його сплави .....   | 139 |
| Тугоплавкі метали та їх сплави .....                                 | 141 |
| Мідь та її сплави .....  | 143 |
| Підшипникові сплави .....  | 146 |
| Благородні метали .....  | 147 |
| <b>Частина II. ТЕРМІЧНА ОБРОБКА МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ</b> .....          | 149 |
| <b>Розділ 12. Теорія термічної обробки</b> .....                     | 149 |
| 12.1. Перетворення в сталі при нагріванні, утворення аустеніту ..... | 151 |
| Вихідна неупорядкована структура .....                               | 151 |
| Вихідна упорядкована структура. Структурна спадковість у сталі ..... | 153 |
| Ріст зерна аустеніту .....   | 154 |
| 12.2. Перетворення переохолодженого аустеніту .....                  | 157 |
| Дифузійні перетворення аустеніту при охолодженні сталі .....         | 157 |
| Перлітні перетворення .....  | 158 |
| Мартенситне перетворення та його особливості .....                   | 162 |
| Проміжне (бейнітне) перетворення .....                               | 167 |
| Ізотермічне перетворення аустеніту в легуваних сталях .....          | 169 |
| Перетворення аустеніту при неперервному охолодженні .....            | 170 |
| 12.3. Перетворення при відпуску загартованої сталі .....             | 173 |
| Коагуляція карбідів .....  | 175 |
| Вплив відпуску на механічні властивості .....                        | 177 |
| Крихкість при відпуску легуваних сталей .....                        | 178 |
| Старіння вуглецевої сталі .....                                      | 179 |
| <b>Розділ 13. Технологія (практика) термічної обробки</b> .....      | 181 |
| 13.1. Відпал першого роду .....                                      | 181 |
| 13.2. Відпал другого роду (з фазовою перекристалізацією) .....       | 183 |
| 13.3. Гартування .....   | 186 |
| Загартовуваність і прогартовуваність сталей .....                    | 190 |
| Внутрішні напруження в загартованій сталі .....                      | 193 |
| Способи гартування .....   | 195 |
| Обробка сталі холодом .....  | 197 |
| 13.4. Відпуск .....  | 197 |
| 13.5. Термомеханічна обробка сплавів .....                           | 199 |
| 13.6. Дефекти, які виникають при термічній обробці сталі .....       | 201 |
| Тріщини .....  | 201 |
| Деформація і жолоблення .....  | 202 |
| <b>Розділ 14. Поверхнєве зміцнення металів і сплавів</b> .....       | 203 |

|  |     |
|--|-----|
| 14.1. Поверхнєве гартування металів і сплавів .....                | 203 |
| 14.2. Особливості хіміко-термічної обробки металів і сплавів ..... | 204 |
| 14.2.1. Дифузійне насичення сталі вуглецем .....                   | 206 |
| 14.2.2. Азотування сталі .....                                     | 208 |
| 14.2.3. Насичення поверхні сталі азотом і вуглецем .....           | 209 |
| 14.2.4. Дифузійне насичення сплавів металами і неметалами .....    | 210 |
| 14.3. Лазерна термічна обробка .....                               | 212 |
| 14.4. Лазерна хіміко-термічна обробка .....                        | 215 |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Розділ 15. Металеві покриття .....</b>                | <b>216</b> |
| 15.1. Електролітичне осаджування металів і сплавів ..... | 216        |
| 15.1.1. Покриття чистими металами .....                  | 216        |
| 15.1.2. Покриття сплавами .....                          | 229        |
| 15.2. Хімічне осаджування .....                          | 233        |
| 15.3. Гарячі нанесення .....                             | 234        |
| 15.4. Плакування .....                                   | 235        |
| 15.5. Металізація напиленням .....                       | 236        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Частина III. ВИБІР МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ<br/>МАШИН .....</b> | <b>238</b> |
|--|------------|

|   |            |
|---|------------|
| <b>Розділ 16. Властивості металічних матеріалів і основи їх раціонального вибору ..</b> | <b>238</b> |
| Фізико-хімічні властивості .....  | 239        |
| Механічні властивості .....   | 239        |
| Тріщиностійкість .....  | 241        |
| Холодноламкість .....   | 242        |
| Втомна міцність .....   | 245        |
| Опір зношуванню .....   | 248        |
| Технологічні властивості .....  | 252        |
| Врахування економічних вимог .....  | 254        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Розділ 17. Використання системних підходів при оптимізації технологій обробки<br/>сплавів .....</b> | <b>256</b> |
|--|------------|

|   |     |
|---|-----|
| Короткий тлумачний словник з металознавства ..... | 268 |
|---|-----|

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| Список літератури ..... | 299 |
|-------------------------|-----|

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| Короткі відомості про авторів ..... | 301 |
|-------------------------------------|-----|

*Світлій пам'яті  
дійсного члена АН УРСР  
Георгія Володимировича Карпенка  
присвячують автори цю книгу*

## ПЕРЕДМОВА

Даний підручник призначений для студентів машинобудівних вузів і в повному об'ємі може використовуватись при вивченні курсів «Матеріалознавство і технологія металів», «Металознавство». Окремі розділи підручника можуть бути використані, при вивченні курсів «Технологія термічної обробки», «Інструментальні матеріали», «Основи використання матеріалів в конструкціях і виробках». Навчальний матеріал у підручнику наведений з врахуванням останніх досягнень металознавства та суміжних наук. При написанні підручника використано досвід наукової роботи авторів у Фізико-механічному інституті ім. Г. В. Карпенка НАН України та багаторічний досвід викладання авторами у Львівському політехнічному інституті (нині — Національний університет «Львівська політехніка»).

Створити цю книгу авторів спонукала фактична відсутність стислого підручника українською мовою, який би об'єдував у собі весь матеріал курсу, а також необхідність стабілізації української технічної термінології. Відомі підручники О. П. Гуляєва «Металловедение» та Ю. М. Лахтіна «Металловедение и термическая обработка металлов», за якими вчилася не одне покоління інженерів, мають обсяг понад 500 сторінок і не в повній мірі відповідають кількості годин, що виділяються для вивчення цих курсів. Сучасні підручники Ю. П. Солнцева та ін. «Материаловедение» та Г. П. Фетисова та ін. «Материаловедение и технология металлов» практично недоступні українському читачу та мають ще більший обсяг — понад 600 сторінок. Підручники В. І. Большакова та ін. «Материалознавство» та О. М. Бяліка та ін. «Металознавство», навчальні посібники А. І. Яцюка та Р. А. Яцюка «Материалознавство» та В. В. Поповича «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство» також не знімають всіх проблем оскільки розкривають не всі частини курсу та лишають деякі прогалини.

Намагання привести зміст книги у відповідність до потреб спеціалістів машинобудівних спеціальностей змусило авторів більше уваги звернути на обробку поверхонь деталей і вибір матеріалів. В деяких підручниках і посібниках цим питанням також приділяється серйозна увага, але рекомендації, що в них містяться носять рецептурний характер, загальні принципи вибору металічних матеріалів і технологій їх обробки розглядаються в недостатньому об'ємі. То ж наявність розділу вибір металів і сплавів для виготовлення деталей машин



у даному підручнику дозволяє більш логічно об'єднати між собою інші розділи книги, пов'язати теорію з практикою. В підручнику також описана методологія використання системного аналізу при дослідженні зв'язків між структурою і властивостями сплавів. Розглянуто принципи і закономірності розробки і побудови інваріантних моделей структури сплавів, реалізація яких на рівні числових оцінок дає можливість проводити фізичне обґрунтування технологій обробки, що забезпечують підвищення експлуатаційної надійності виробів, відкриває можливості для більш широкого застосування в металознавстві електронно-обчислювальної техніки.

При створенні підручника автори максимально старалися врахувати діючі державні стандарти України: ДСТУ 2494—94 «Метали. Оброблення зміцнювальне. Терміни та визначення»; ДСТУ 2494—94 «Прокат чорних металів. Терміни та визначення дефектів поверхні»; ДСТУ 2552—94 «Руди залізни та марганцеві. Види і властивості. Терміни та визначення»; ДСТУ 2733—94 «Корозія та тимчасовий протикорозійний захист металевих виробів. Терміни та визначення»; ДСТУ 2541—94 «Вирбництво ливарне. Терміни та визначення»; ДСТУ 2751—94 «Металургія порошкова. Терміни та визначення» та ДСТУ 3830—98 «Корозія металів і сплавів. Терміни та визначення основних понять».

Автори глибоко вдячні рецензентам: член-кореспонденту НАН України, професору О. М. Романіву і професору С. В. Кондратюку за цінні поради та зауваження що були висловлені в процесі роботи над підручником. Авторі також вдячні О. В. Мельникову та співробітникам видавництва за допомогу, що була надана при підготовці підручника до друку.

Автори будуть вдячні за зауваження та побажання, спрямовані на покращення змісту підручника, які можна надсилати за адресою: 79005, м. Львів, вул. Костя Левицького, буд. 4, ПТВФ «Афіша». E-mail: *publish-afisha@utel.net.ua*.

## ВСТУП

В історії суспільства метали і сплави завжди відігравали важливу роль, оскільки ніяка праця без них неможлива. Відповідно до матеріалу, з якого люди виготовляли собі знаряддя для добування засобів до життя, розрізняють великі історичні епохи:

Кам'яний вік — 800 тисяч років тому;

Мідний вік — IV тисячоліття до н. е.;

Бронзовий вік — III тисячоліття до н. е.;

Залізний вік — середина II тисячоліття до н. е.

Тривалий час людство використовувало такі матеріали, як каміння, дерево, кість, ріг тому технологія матеріалів починається з давніх часів. Одним з перших матеріалів у житті людини був камінь. Але і бронза, залізо та інші метали мають в першооснові каміння — руду.

На початку цінність каменя визначали виключно за його формою та масою. Потім люди звернули увагу на твердість каменю. Далі вже зацікавились його складом і внутрішніми властивостями. Пізнавши властивості каменю, вони почали відкривати закони фізики, хімії. Вивчення відбитків рослин і тварин на камінні, дало змогу проникати у таємниці органічного світу. І чим глибше пізнавала людина каміння, тим більше нових матеріалів вдалося їй створити, тим сильнішою вона ставала в протистоянні природі. Будуючи міста, фабрики, заводи, прокладаючи дороги, запускаючи у космос ракети, людина використовує у роботі незліченну кількість мінеральної сировини. З розвитком машинної індустрії значення матеріалів різко зросло, а технологія їх обробки стала вдосконалюватись.

Коли йдеться про нові досягнення сучасної техніки, слід пам'ятати, що однією з їх передумов було створення нових матеріалів з наперед заданими властивостями (міцністю, твердістю, зносостійкістю, стійкістю до дії високих температур і агресивного середовища і т. п.). І хоча у металів з'явилися серйозні конкуренти, такі як полімери та керамічні матеріали, вони зберігають свої вагомні позиції у основних сферах людської діяльності. Особливе значення в історії людства має залізо — один з основних продуктів сучасної промисловості. Ще народи давнього світу виробляли й використовували залізо і його сплави та піддавали їх термічній обробці.

Нині з металу або з його допомогою виробляють величезну кількість предметів — від цвяха до космічного корабля. Виробництво металів, уміння



покращувати їх властивості, створення матеріалів з наперед заданими властивостями — важливі показники, що характеризують рівень розвитку суспільства, віддзеркалюють ступінь техніко-економічної зрілості країни.

Швидкий розвиток техніки вимагав застосування нових металічних матеріалів, що стало можливим тільки тоді, коли почалось систематичне вивчення зв'язків між складом, обробкою, будовою і властивостями металів і сплавів. Усе це вимагало також підготовки фахівців з металознавства. Значний внесок у цю справу зробив німецький вчений Георг Бауер (1494—1555), більше знаний за своїм латинським іменем Агрікола. Він опублікував фундаментальну працю «Про гірничу справу та металургію», у якій докладно описав усі відомі на той час мінерали, техніку видобування та способи збагачення руд, тогочасні обладнання та процеси металургії. Михайло Васильович Ломоносов (1711—1765), що був знайомий з працею Агріколи та інших європейських вчених, у 1763 році видав свою класичну працю «Перші основи металургії або рудних справ», що багато десятиліть служила в Росії підручником з металознавства та металургії.

Вперше використав хімічне травлення зразків для дослідження сталі французький вчений Р. Реомюр (1683—1757). Систематичні металографічні дослідження проведені австрійським вченим А. Відманштеттом (1754—1849) дозволили вивчити структуру метеоритного заліза, встановити присутність аналогічної структури в сталевих зливках і в перегрітій сталі. На честь вченого, що відкрив цю структуру, вона була названа відманштеттовою. Застосування протекторного захисту для зменшення корозії мідних частин корпусів кораблів було запропоновано англійським вченим Х. Деві (1778—1829), який використав з цією метою залізнi листи, що кріпились до корпусу корабля нижче ватерлінії.

На протязі багатьох століть застосування металів і сплавів та їх обробка мали ремісничий характер. Випадково відкриті секрети виробництва передавались із покоління в покоління, поки такі «естафети» знань не переривались. Відомим прикладом втраченого секрету є випадок із булатною сталлю, яка застосовувалась із давніх часів для виготовлення зброї високої якості. Булатом ця сталь називалась в Російській імперії, дамаскою — на Близькому Сході, толедською — в Іспанії, і сталлю вуц в Індії. На початку XIX ст. секрет виготовлення і обробки цієї сталі був втрачений. В різних країнах намагались відновити втрачену технологію, але ці намагання успіху не мали.

Вирішив цю складну технічну проблему Павло Петрович Аносов (1799—1851), який в першій половині XIX століття налагодив масове виробництво булатної зброї на Златоустівському заводі. При вирішенні цієї проблеми для вивчення будови сталі П. П. Аносов вперше у світі (1831 р.) застосував мікроскоп.

Винахідником конверторного способу отримання сталі вважають англійця Генрі Бесемера (1813—1898), який вперше запропонував і здійснив (1854—1856 рр.) виплавку сталі, не витрачаючи палива, шляхом продування повітря через розплавлений чавун. Бесемєрівський процес (1878 р.) розвинув англійський інженер Сідні Томас (1850—1885). Він запровадив у практику футерування конверторів доломітом. Таке футерування дозволило вилучати з чавуну фосфор,

і, частково, сірку. У Франції 1864 року інженеру П'єру Мартену (1824—1915) вдалося отримати на поду полуменевої печі рідку сталь, до того цим шляхом отримувати сталь у тістоподібному стані. Для цього він застосував принцип регенерації теплоти охолоджувальних пічних газів для підігрівання палива і повітря, яке подають у піч.

Дослідження структури сталей і чавунів в залежності від швидкості охолодження були проведені німецьким вченим А. Ледебуром (1837—1906), на честь якого була названа структурна складова сплавів Fe—C, і А. Мартенсом (1850—1914), прізвищем якого була названа структурна складова, що утворюється при швидкому охолодженні сталей.

Теорія будови сталі отримала розвиток в роботах Олександра Степановича Лаврова (1838—1904), який описав явище ліквіації і встановив її залежність від розмірів зливка. Він вперше у 1891 році застосував алюміній для розкислення сталі, запропонував, виготовив і використав на практиці термітні порошки.

Початки теорії і наукових основ технології термічної обробки сталі були закладені у працях Дмитра Константиновича Чернова (1839—1921). Його відкриття (критичні температури, названі згодом точками Чернова, — 1869 р.; вдосконалення конверторного процесу — підігрівання малокремнистого чавуну у вагранці перед продувкою; застосування збагаченого киснем повітря для продувки рідкого чавуну — 1876 р.; теорія кристалізації зливка — 1879 р.) дістали визнання у всьому світі. Д. К. Чернова було обрано почесним членом американського інституту гірничих інженерів і ряду інших наукових закладів. Видатний американський металург Г. М. Хоу присвятив свою ґрунтовну працю, видану в 1903 р.: «Професору Д. К. Чернову, батькові металографії заліза». Заслуги вченого у розвитку науки про метали настільки великі, що у 1900 році у Парижі на відкритті Всесвітньої виставки, де зібралися експерти-металурги всіх країн, її голова Монгольф'є сказав: «Вважаю своїм обов'язком відкрити і публічно заявити у присутності стількох знавців і спеціалістів, що наші заводи і вся сталеварна справа зобов'язана сучасним розвитком і успіхом значною мірою працям і дослідженням російського вченого інженера Д. К. Чернова, та запрошую вас висловити йому наше визнання і вдячність від імені всієї металургійної промисловості». Своїм відкриттям Д. К. Чернов заклав теоретичні передумови створення металознавства як науки.

У 1888 році, французький інженер-металург Флоріс Осмонд (1849—1912) лабораторним шляхом за допомогою термоелектричного пірометра Ле-Шательє, визначив критичні точки Чернова  $A_1$  та  $A_3$ .

Уперше в 1908 році застосував закони фізичної хімії для пояснення процесів, що відбуваються в бесемерівському конвертері і у сталевій ванні мартенівської печі Володимир Юхимович Грум-Гржимайло (1864—1928).

Перший етап розвитку металознавства у сучасному розумінні цієї дисципліни припадає на 70-ті роки XIX ст. — 20-ті роки XX ст. У цей період в Англії, Німеччині, Росії, США, Франції, Швеції, Японії та інших країнах були виконані



численні роботи з вивчення мікроструктур, впливу на них теплової обробки, властивостей залежно від структури металів. На машинобудівних і металургійних заводах створюються перші металознавчі лабораторії, при політехнічних інститутах — нові факультети, які готують інженерів-металургів, металознавців. Тут ведуться дослідження, які заклали фундамент металознавства. Переважно це були експериментальні пошуки. Наприклад, Томас Едісон (1847—1931), щоб знайти матеріал для лампочки розжарювання, перепробував десять тисяч різних матеріалів, поки не підібрав вугільну нитку, що може нагріватися до високої температури у вакуумі.

1898 року англійський вчений У. Робертс-Аустен (1843—1902), чийм ім'ям названо одну із структур сталі — аустеніт, опублікував перше систематизоване дослідження сплавів заліза з вуглецем і діаграму стану системи залізо-вуглець. В Англії 1888 року Роберт Гадфільд (1858—1940) видав працю про леговані сталі.

Систематичні дослідження структурних і фазових перетворень були виконані відомим американським вченим Е. Бейном (1891—1974). В 1929 р. Бейн опублікував роботу по дослідженню розпаду аустеніту при ізотермічному відпалі. Йому першому вдалось виділити продукти перетворення, які характерні для певних температур перетворення, а не змішані продукти, що отримуються при неперервному охолодженні.

В 1889 р. шотландський інженер із Глазго Дж. Райлі заявив про створення ним нікелевої сталі.

Розробка в 1902 р. американськими вченими Ф. Тейлором і М. Уайтом швидкорізальної сталі привела до перевороту в машинобудуванні. Різно зросла продуктивність обробки, з'явилися нові швидкісні верстати і автомати.

На початку XX ст. німецький дослідник А. Вільм створив високоміцний сплав алюмінію з міддю — дуралюмін, міцність якого внаслідок старіння в декілька разів перевищила міцність технічного алюмінію і інших алюмінієвих сплавів при збереженні достатнього запасу пластичності. Використання дуралюміну в літакобудуванні на тривалий час визначило прогрес в цій галузі техніки.

В 1919 році американський металознавець П. Меріка відкрив природу старіння дуралюмінів, пов'язавши зміцнення при старінні з утворенням дисперсних виділень в пересиченому твердому розчині. Це було одне із найбільш видатних досягнень в теорії термічної обробки: за діаграмами стану із змінною розчинністю компонентів у твердому стані стало можливим передбачити області хімічних складів сплавів, які здатні до дисперсійного твердіння.

Успіхи вчених у цей час дозволили металознавству стати теоретичним підґрунтям багатьох технологічних дисциплін, таких як металургія (вилавка та розливка сплавів), обробка тиском, ливарне виробництво, термічна обробка, порошкова металургія.

Новий якісний крок у подальшому розвитку металознавства було зроблено завдяки працям академіка М. С. Курнакова (1860—1941), який побудував і вивчив діаграми стану багатьох металевих систем.

Із розвитком металознавства ставало зрозуміло, що одного знання структури та властивостей матеріалу недостатньо, що необхідно збагнути сутність явищ, тобто атомнокристалічну будову металів. Проте обійтися тут лише металографічним мікроскопом було вже неможливо.

Другий етап розвитку металознавства розпочинається з 20-х років XX ст., коли для дослідження металевих сплавів було застосовано рентгеноструктурний аналіз, який дав змогу виявити закономірності атомної та структурної будови металів та зміну цієї будови під впливом теплової, хімічної та механічної обробки. Починаючи з цього часу, у металознавстві широко використовуються фізичні методи дослідження, що споріднює сучасне металознавство із фізикою твердого тіла взагалі та фізикою металів зокрема. Крім рентгеноструктурного аналізу застосовують електронномікроскопічний фазовий аналіз та інші способи фізичних досліджень, а також методи визначення різних фізичних властивостей. Для вивчення дифузії металів, ліквідації, зношування та виявлення внутрішніх дефектів у масивних металевих виробах використовують метод радіоактивних ізотопів. Швидкопротікаючі перетворення у сплавах досліджують методами мікрокінозйомки, осцилографії та ін.

Незаперечними є заслуги відомого вченого А. М. Бочвара (1870—1947), який розробив теорію антифрикційних сплавів, створив ряд підшипникових сплавів, започаткував металознавство урану і плутонію, жароміцних кольорових металів. А. А. Бочвар (1902—1984). Довго залишалася невідомою природа загартованої сталі але у 1927 році Г. В. Курдюмов (1902—1992) визначив, що структура загартованої сталі — це перенасичений розчин вуглецю в залізі. Великий внесок у розвиток металознавства зробив академік О. О. Байков (1870—1946), який розвинув основи теорії фазових перетворень і металургійних процесів.

Суттєве значення для розвитку металознавства в XX столітті мають праці О. П. Гуляєва, К. П. Буніна, Б. М. Арзамасова, Ю. М. Лахтіна, І. М. Богачова, В. Д. Садовського.

Академік Є. О. Патон розробив основи теорії міцності зварних з'єднань металів і сплавів, дугове зварювання під флюсом (1940, р.). Під керівництвом президента НАН України Б. Є. Патона були створені технології зварювання різномірних металів і сплавів, розвинуті нові напрямки металургії і зокрема — спецелектрометалургія.

Значний внесок у розвиток металознавства зробили такі українські вчені: М. М. Давиденков, Б. Л. Медовар, Ю. А. Шульте, М. П. Браун, Б. С. Натапов, Б. Б. Винокур, Є. В. Серенсен, І. М. Францевич, В. М. Хрушов.

Основи теорії і практики цементації сталей були закладені І. А. Фещенко-Чопівським (1894—1952).

Явище оберненості мартенситних перетворень, механізм і кінетика перетворення перліту в аустеніт, відпуск загартованої сталі, природу переходу металу з об'ємно-центрованими кубічними решітками в крихкий стан, фазові перетворення в титанових сплавах були вивчені академіком В. Н. Гридневим, С. П. Ошкадьоровим, О. М. Івасишиним та їх учнями.



На основі наукових розробок нові технічні рішення по підвищенню якості і експлуатаційних характеристик прокату були розроблені під керівництвом академіка К. Ф. Стародубова, його учнями І. Г. Узловим, В. Я. Савенковим, В. К. Бабичем, І. Є. Долженковим.

Важливе значення для розвитку теорії кристалізації і термічної обробки сплавів з метою отримання оптимального співвідношення показників фізичних, хімічних, механічних та інших властивостей мають роботи академіка Ю. М. Тарана та його учнів.

Створення і розвиток наукового напрямку фізико-хімічної механіки матеріалів під керівництвом академіка Г. В. Карпенка, дало можливість розробити нові сплави із заданими властивостями для роботи в активних середовищах.

Розрахункові моделі твердого тіла, які застосовуються для оцінки тріщиностійкості металічних матеріалів були розроблені академіком В. В. Панасюком.

Основні положення структурної механіки руйнування були розвинуті в роботах О. М. Романіва. Теорія і практика дифузійного насичення сплавів металами і неметалами, захисту від корозії отримала розвиток в роботах В. І. Похмурського, Г. Г. Максимовича, І. І. Василенка.

Прискорення науково-технічного прогресу нерозривно пов'язане із ефективним застосуванням традиційних і розробкою нових металічних матеріалів. В Україні питаннями подальшого удосконалення металів та сплавів, проведенням фундаментальних та наукових досліджень займаються: Інститут металофізики; Фізико-технологічний інститут металів та сплавів; Інститут надтвердих матеріалів; Інститут електродварювання ім. Є. О. Патона; Інститут проблем міцності; Інститут проблем металознавства; Фізико-технічні інститути (у Харкові та Донецьку); Дніпропетровський інститут чорної металургії; Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка.

Металознавство, як спеціальна дисципліна сформувалася протягом останніх ста років та викладається конструкторам та металургам як самостійна дисципліна чи як складова матеріалознавства іншим спеціалістам у вищих навчальних закладах. В нашій державі підготовка спеціалістів, які вивчають дану дисципліну ведеться у всіх вищих технічних навчальних закладах. Потрібно відзначити, що металознавство почали вивчати у навчальних закладах на території сучасної України з XIX століття в Київському та Львівському політехнічних інститутах.

В наш час виробництво металів виконує одну з основних функцій в господарстві будь-якої країни, а продукція металургії має пріоритетне значення на світових ринках. Металургійна промисловість, як галузь світової економіки, розвивається в стійкому режимі, хоча і невисокими темпами.

Глибокі якісні і структурні зміни в світовій економіці сприяли росту металозбереження у всіх сферах господарювання. Підтвердженням цього є тенденція зниження розрахункового показника питомого споживання сталевих продукції на одиницю валового внутрішнього продукту. Це досягається новими розробками в металургії, а також розширенням використання пластмас, кераміки,



композитів, до складу яких входять, як металеві так і неметалеві матеріали, а також аморфних матеріалів, що отримуються методами гранулометалургії. У світі вводяться нові потужності по виробництву сталі, причому 70% в країнах, що розвиваються. Якщо на початку 70-х років XX століття сталь виплавляли у 65 країнах світу, то зараз більше ніж у 100 країнах, які створили національні металургійні комплекси, що конкурують на міжнародних ринках.

Загальна динаміка розвитку сталеплавильної промисловості наведена в табл. 1.

Таблиця 1

## Динаміка світового виробництва сталі за роками, млн. т.

| Країни і групи країн | 1990  | 1992  | 1995  | 1997  | 1998  | 2000  | 2001  |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Світ в цілому        | 770,3 | 722,7 | 750,4 | 748,1 | 711,5 | 847,6 | 846,9 |
| Китай                | 66,3  | 80,2  | 94,0  | 107,3 | 113,5 | 127,2 | 148,9 |
| США                  | 89,7  | 84,3  | 95,2  | 99,2  | 94,5  | 101,8 | 90,1  |
| Японія               | 110,3 | 98,1  | 101,6 | 104,5 | 97,5  | 106,4 | 102,9 |
| Російська Федерація  | 89,6  | 62,1  | 49,2  | 48,4  | 44,2  | 59,1  | 59,0  |
| Республіка Корея     | 23,1  | 28,0  | 36,8  | 42,5  | 36,4  | 43,1  | 43,9  |
| Україна              | 55,0  | 41,8  | 20,9  | 23,5  | 22,1  | 31,8  | 33,1  |

Аналіз даних показує падіння світового виробництва сталі після 1990 р. Позиції галузі початку десятиріччя були відновлені. Але в 90-ті роки відбулись значні зміни в об'ємах виробництва сталі в різних країнах. Зокрема частка країн Далекого Сходу і Південно-Східної Азії у світовому виробництві сталі зросла в 1,6 рази. Китай по виробництву сталі вийшов на 1-е місце в світі. Стан металургійної промисловості України характеризується даними наведеними в табл. 2.

Таблиця 2

## Виробництво продукції чорної металургії України за роками, млн. т

| Роки | Товарна руда |            | Чавун | Сталь | Стальні труби |        | Готовий прокат чорних металів |
|------|--------------|------------|-------|-------|---------------|--------|-------------------------------|
|      | залізна      | марганцева |       |       | млн. т        | млн. м |                               |
| 1    | 2            | 3          | 4     | 5     | 6             | 7      | 8                             |
| 1913 | 6,9          | 0,3        | 2,9   | 2,4   | 0,1           | —      | 1,9                           |
| 1940 | 20,2         | 0,9        | 9,6   | 8,9   | 0,6           | —      | 5,6                           |
| 1950 | 21,0         | 0,9        | 9,2   | 8,4   | 0,9           | —      | 5,8                           |
| 1960 | 59,1         | 2,7        | 24,2  | 26,2  | 2,2           | 227,0  | 18,0                          |
| 1970 | 111,0        | 5,2        | 41,4  | 46,6  | 4,5           | 452,0  | 32,7                          |
| 1980 | 125,0        | 6,9        | 46,5  | 53,7  | 6,3           | 686,0  | 36,0                          |

| 1    | 2     | 3   | 4    | 5    | 6   | 7     | 8    |
|------|-------|-----|------|------|-----|-------|------|
| 1990 | 105,0 | 7,1 | 44,9 | 52,6 | 6,5 | 599,0 | 38,6 |
| 2000 | 55,9  | 2,7 | 25,7 | 31,8 | 1,7 | 229,0 | 22,6 |
| 2001 | 54,8  | 2,7 | 26,4 | 33,5 | 1,7 | 227,0 | 25,4 |

Сучасні технології, що застосовуються у промисловості та інших сферах господарської діяльності формують підвищений попит на конструкційні матеріали з високими експлуатаційними властивостями, які закладають основи для чергового етапу технологічної революції.

За останні роки металознавство зробило нові кроки: почали застосовуватись більш сучасні види термічної і хіміко-термічної обробки сталей, розвинута теорія легування і мікролегування сплавів, на її основі створені високоміцні, корозійностійкі, жароміцні сталі, а також сплави алюмінію, магнію, титану та інших металів. З розвитком електровакуумної техніки, напівпровідникової електроніки, ядерної промисловості все більш широко застосовуються в техніці рідкісні метали та їх сплави.

Металознавство — це наука, що вивчає залежність між складом, будовою, властивостями металів і сплавів та закономірності їх змін під впливом зовнішніх факторів з метою вибору і створення сплавів з наперед заданими властивостями у відповідності із вимогами їх практичного використання.

Завдання даного курсу — надати студентам необхідні знання про основні металічні матеріали, їхній склад, властивості та призначення; про техніко-економічну ефективність застосування тих чи інших металічних матеріалів; про принципи вибору цих матеріалів залежно від конкретних умов їх роботи; про те, чому одні метали і сплави тверді та міцні, інші — пластичні та в'язкі, одні — кислото- та жаростійкі, інші — швидко розчиняються в кислотах і легко окисляються, одні є жароміцними, інші — втрачають міцність з підвищенням температури тощо; про те, в який спосіб і в якому напрямку можна змінити властивості того чи іншого металу і що внаслідок цього можна отримати. Ці знання необхідні для курсового та дипломного проектувань, спеціалістам — для їх практичної діяльності.

Наука про метали наближається до такого стану, коли на основі системного аналізу з використанням обчислювальних машин, можна буде проводити обґрунтування хімічного складу, структури, прогнозувати і розраховувати з достатньою точністю властивості нових унікальних сталей і сплавів.

## Розділ 7

### КОНСТРУКЦІЙНІ СТАЛІ

Матеріали, які призначені для виготовлення конструкційних елементів, деталей машин і механізмів, повинні поряд з високою міцністю і пластичністю мати достатній опір ударним навантаженням, підвищений запас в'язкості. При знакозмінних навантаженнях використовують конструкційні матеріали з високою втомною міцністю, а при терті зносостійкістю. В багатьох випадках необхідна корозійна стійкість, опір крихкому руйнуванню і розповсюдженню тріщин.

Крім високої надійності і конструкційної міцності конструкційні матеріали повинні мати високі технологічні властивості — хороші ливарні властивості, оброблюваність тиском, різанням, зварюваність. Конструкційні матеріали повинні бути дешевими і не містити дефіцитних легуючих елементів.

Із всіх матеріалів, що застосовуються в даний час, тільки сталь дозволяє отримувати поєднання високих механічних характеристик і хорошу технологічність при порівняно невисокій вартості.

Розрізняють такі види конструкційних сталей: вуглецеві, в тому числі автоматні сталі; будівельні; сталі, що цементуються; сталі, що поліпшуються; високоміцні; пружинно-ресорні; підшипникові; зносостійкі.

#### Автоматні сталі

Відрізняються високою оброблюваністю різанням, яка досягається введенням у конструкційну сталь S, P, Se, Te, Ca й утворенням неметалічних включень, або Pb, який утворює металічні включення. Наявність у сталі неметалічних, або металічних включень з низькою температурою плавлення призводить до утворення плівки між інструментом і заготовкою, що знижує коефіцієнт тертя в умовах різання. Присутність сірки і фосфору полегшує відділення стружки і руйнування металу, сприяє отриманню гладкої блискучої поверхні різання. У разі механічної обробки автоматних сталей утворюється коротка, ламка стружка, що особливо важливо при обробці на швидкохідних верстатах-автоматах. Недоліком автоматних сталей є їхня понижена пластичність. Це пов'язано з тим, що переважна більшість включень в умовах прокатування сприяє утворенню смугастої структури, що викликає появу анізотропії властивостей. S і P в автоматні сталі вводять у кількості 0,1—0,2 %. Сталі застосовують для виготовлення деталей, від яких не вимагаються високі механічні показники (деталі кріплення, пальці, втулки тощо).

Маркуються автоматні сталі буквою «А» і двома цифрами, що показують вміст вуглецю у відсотках: А12, А20, А30, А40Г.



### Будівельні сталі

Вони містять відносно малі кількості 0,1—0,25 % С. В низьколегованих будівельних сталях порівняно з вуглецевими більш висока міцність досягається зміцненням фериту за рахунок присутності порівняно малих кількостей кремнію і марганцю, а також хрому, нікелю, міді й деяких інших елементів.

Ці сталі використовують у гарячекатаному або нормалізованому стані для армування залізобетону, для виготовлення зварних конструкцій в будівництві, мостобудуванні, вагонобудуванні, сільськогосподарському машинобудуванні, корпусів кораблів у кораблебудуванні, для виготовлення магістральних нафто- і газопроводів.

Деталі будівельних конструкцій в більшості випадків з'єднують зварюванням. Тому основною вимогою до будівельних сталей є хороша зварюваність. Це означає, що сталь при зварюванні не повинна давати гарячих і холодних тріщин і властивості зварного з'єднання (металу шва і зони термічного впливу) не повинні суттєво відрізнятися від властивостей основного металу.

Гарячі тріщини утворюються в зварному шві в період кристалізації. Утворенню гарячих тріщин сприяє розширення інтервалу кристалізації металу шва. Інтервал кристалізації зростає зі збільшенням вмісту вуглецю. Метал шва і біляшовної зони нагрівається вище критичних точок. При охолодженні протікає процес розпаду аустеніту, який супроводжується об'ємними змінами. Чим вищий вміст вуглецю, тим більші об'ємні зміни, і зростає небезпека утворення холодних тріщин.

Тому сталі, що використовуються для виготовлення будівельних конструкцій, містять не більше 0,25 % С.

Будівельні вуглецеві сталі звичайної якості марок Ст2, Ст3 мають границю текучості  $\sigma_{0,2} = 240$  МПа. При вмісті 1,5 % Мп і 0,7 % Si границя текучості зростає до 360 МПа.

До низьколегованих будівельних сталей відносяться сталі марок 14Г2, 17ГС, 14ХГС, 15ХСНД. Сталь 15ХСНД, яка містить Ni і Cu, працює в конструкціях при температурах до  $-60^{\circ}\text{C}$  і забезпечує їх високий опір крихкому руйнуванню. Крім того, введення цих елементів збільшує корозійну стійкість сталі в атмосферних умовах. Для додаткового зміцнення в будівельні сталі вводять у невеликих кількостях V і Nb до 0,1 % разом з 0,015—0,025 % N, що приводить до утворення карбонітридів і подрібнення зерна. До сталей такого типу відносяться низьколеговані сталі марок 14Г2АФ, 17Г2АФБ та інші із  $\sigma_{0,2} = 450$  МПа після нормалізації. Такі сталі використовують у будівництві і машинобудуванні у вигляді листів, сортового фасонного прокату для виготовлення зварних конструкцій без додаткової термічної обробки.

Застосування в будівельних конструкціях більш міцних низьколегованих сталей замість вуглецевих дає можливість знизити витрату металу на 15—25 %. Тому їх використання економічно доцільне, незважаючи на більш високу вартість.

Для додаткового підвищення механічних властивостей і зниження порогу холодноламкості використовують контрольоване прокатування. Воно включає проведення деформації, особливо в кінці процесу, при більш низькій температурі 800—850 °С зі збільшенням ступеню деформації на останніх проходах. Ефект контрольованого прокатування полягає в значному подрібненні зерна, а також зміцненні сталей частками карбонітрідів.

Для армування звичайного і попередньо напруженого залізобетону використовують гладкий або періодичний прокат з більш міцних сталей з вмістом до 0,3 % С: 25Г2С, 30ХГС.

В мостобудуванні для виготовлення зварних конструкцій застосовуються сталі з високою міцністю  $\sigma_{0,2} \geq 600$  МПа: 10ХСНД, 15ХСНД, 10Г2СД, 10Г2АФ.

У вагонобудуванні і сільськогосподарському машинобудуванні використовуються сталі, в яких  $\sigma_{0,2} \geq 750$  МПа: 12Г2СМФ, 14ГСМР та ін.

Для забезпечення надійної роботи нафто- і газопроводів застосовують низьколеговані сталі із  $\sigma_s \geq 500$  МПа,  $\sigma_T \geq 300$  МПа,  $\delta \geq 16\%$  і ударною в'язкістю при -70 °С не менше 400 КДж/м<sup>2</sup>.

Для виготовлення нафтопровідних труб великого діаметра до 2500 мм застосовують вуглецеві сталі з вмістом не більше: 0,22 % С; 0,65 % Мп; 0,37 % Si і низьколеговані сталі з вмістом не більше 0,20 % С і 1,65 % Мп, а також добавками Сг, V, Nb та ін.

Для виготовлення магістральних газопровідних труб великого діаметру використовують сталі 14ХГС ( $\sigma_s = 580$  МПа,  $\sigma_T = 350$  МПа), 17Г1С ( $\sigma_s = 520$  МПа,  $\sigma_T = 370$  МПа), 16Г2САФ ( $\sigma_s = 600$  МПа,  $\sigma_T = 420$  МПа), 16Г2АЮ ( $\sigma_s = 550$  МПа,  $\sigma_T = 370$  МПа) і 08Г2МФБ ( $\sigma_s = 600$  МПа,  $\sigma_T = 450$  МПа) в гарячекатаному стані і сталі 09Г2С ( $\sigma_s = 500$  МПа,  $\sigma_T = 350$  МПа) і 17ГСФ ( $\sigma_s = 600$  МПа,  $\sigma_T = 420$  МПа) в термозміцненому стані.

Останнім часом для магістральних трубопроводів як перспективний матеріал використовують двофазні сталі з ферито-бейнітною або ферито-мартенситною структурою після контрольованого прокатування. Ці сталі містять 0,03—0,1 % С; 1,6 % Мп; 0,6 % Сг; 0,6 % Si; 0,02 % Ti; 0,03—0,18 % Nb і мають  $\sigma_s = 700$  МПа при  $T_{30}$  від -80 до -90 °С.

Для захисту трубопроводів від корозії в залежності від умов їх експлуатації застосовують покриття.

### Сталі, що цементуються

Для виготовлення деталей, що працюють під дією динамічних навантажень в умовах поверхневого зношування, застосовують низьковуглецеві сталі, які містять біля 0,2 % С і піддаються цементації, гартуванню і низькому відпуску.

Твердість поверхні готової деталі повинна становити HRC 50—60. На відміну від вуглецевих сталей, що мають низьку прогартовуваність, при цементації і термічній обробці легованих сталей відбувається додаткове зміцнення серцевини деталей. Це зміцнення тим більше, чим більш легована сталь.



Розділяють три групи сталей, що цементуються: із серцевиною, що зміцнюється, а також із серцевиною, що зміцнюється слабо і сильно (табл. 15)

До першої групи відносять вуглецеві сталі марок 10, 15, 20. Їх застосовують для маловідповідальних деталей із серцевиною, що незміцнюється і деталей невеликих розмірів. Під цементованим шаром аустеніт перетворюється в ферито-перлітну суміш.

Другу групу складають низьколеговані хромисті сталі марок 15Х, 20Х, що мають невисоку прогартуваність. Додаткове легування малими добавками ванадію (сталь 15ХФ) дозволяє отримати більш дрібне зерно, що покращує пластичність і в'язкість сталі.

Сталі третьої групи використовують для виготовлення деталей, що працюють при значних ударних навантаженнях, мають великий переріз, або складну конфігурацію, або для деталей, які піддаються дії значних знакозмінних напружень. У склад цих сталей вводять нікель: 20ХН, 12ХЗА, 12Х2Н4А. Внаслідок дефіцитності нікеля його іноді замінюють марганцем і додатково вводять невеликі кількості титану або ванадію для подрібнення зерна (18ХГТ).

Легування хромонікелевих сталей вольфрамом або молібденом додатково стабілізує переохолоджений аустеніт і ще більше підвищує прогартуваність сталі. У результаті гартування в мастилі серцевина деталей отримує структуру мартенситу. Такі сталі (18Х2Н4ВА або 18Х2Н4МА) застосовують для важко-навантажених зубчастих коліс, осей, роликів тощо. Ці деталі є стійкими до динамічних навантажень.

Таблиця 1

**Характеристики сталей, що цементуються після гартування  
і низького відпуску, ГОСТ 1050-88, ГОСТ 4543-71**

| Марка сталі | Вміст елемента, % |           |           |           |              | $\sigma_{0.2}$ , МПа | $\sigma_s$ , МПа | $\delta$ , % | $\psi$ , % | КCU, МДж/м <sup>2</sup> |
|-------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|--------------|----------------------|------------------|--------------|------------|-------------------------|
|             | C                 | Mn        | Ni        | Cr        | інші         |                      |                  |              |            |                         |
| 10*         | 0,07—0,14         | 0,35—0,65 | —         | ≤0,15     | —            | 205                  | 330              | 31           | 55         | —                       |
| 20*         | 0,07—0,14         | 0,35—0,65 | —         | ≤0,25     | —            | 245                  | 410              | 25           | 55         | —                       |
| 15Х         | 0,12—0,18         | 0,4—0,7   | —         | 0,7—1,0   | —            | 490                  | 690              | 12           | 45         | 0,7                     |
| 20Х         | 0,17—0,23         | 0,5—0,8   | —         | 0,7—1,0   | —            | 635                  | 780              | 11           | 40         | 0,6                     |
| 15ХФ        | 0,12—0,18         | 0,4—0,7   | —         | 0,8—1,1   | 0,06—0,12 V  | 540                  | 740              | 13           | 50         | 0,8                     |
| 20ХН        | 0,17—0,23         | 0,4—0,7   | 1,0—1,4   | 0,45—0,75 | —            | 590                  | 780              | 14           | 50         | 0,8                     |
| 18ХГТ       | 0,17—0,23         | 0,8—1,1   | —         | 1,0—1,3   | 0,03—0,09 Ti | 885                  | 980              | 9            | 50         | 0,8                     |
| 12ХНЗА      | 0,09—0,16         | 0,3—0,6   | 2,75—3,15 | 0,6—0,9   | —            | 685                  | 930              | 11           | 55         | 0,9                     |
| 12Х2Н4А     | 0,09—0,151        | 0,3—0,6   | 3,25—3,65 | 1,25—1,65 | —            | 930                  | 1130             | 10           | 50         | 0,9                     |

\*Властивості сталі для нормалізованого стану

### Сталі, що поліпшуються

До конструкційних сталей, що поліпшуються відносять середньовуглецеві сталі, що містять 0,3—0,5 % С і легуючі елементи в кількості не більше 5 %. Ці сталі використовують після операцій гартування і високого відпуску, які називають покращенням. Для зменшення термічних напружень гартування таких сталей у більшості випадків проводять у масилі. Температура відпуску складає 550—650 °С. Після термічної обробки сталі мають структуру сорбіту, який характеризується високим опором ударним навантаженням.

Покращувані сталі мають високу міцність, в'язкість, малу чутливість до концентраторів напружень і підвищену прогартуваність.

У випадку суцільної прогартуваності після однакової термічної обробки властивості різних марок сталей близькі між собою. Тому вибір тієї або іншої марки поліпшуваної сталі в кожному конкретному випадку обумовлений прогартуваністю сталі, перерізом деталі й складністю її конфігурації, наявністю концентраторів напружень. Вибирають потрібну марку сталі залежно від заданих міцності та розміру перерізу певних деталей чи виробів, керуючись спеціальною діаграмою (рис. 72).

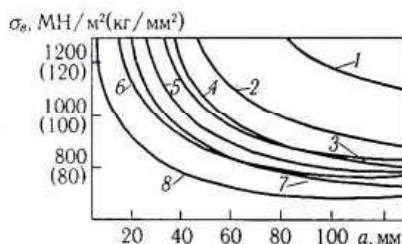


Рис. 72. Діаграма для вибору марок конструкційної сталі залежно від міцності та розмірів перерізу  $a$  за С. М. Барановим:

- 1 — сталь 30ХНЗМ; 2 — сталь 30ХНЗ;  
3 — сталь 34ХМА; 4 — сталь 33ХСА;  
5 — сталь 33НЗ; 6 — сталь 35ХА;  
7 — сталь 35СГ; 8 — сталь 30

Сталі, що поліпшуються можуть бути умовно розділені на 5 груп. Зі зростанням номера групи росте ступінь легування і розмір перерізу, в якому досягається суцільна прогартуваність (табл. 16).

До групи I відносяться вуглецеві сталі марок 35, 40, 45, що мають критичний діаметр  $D_{95}$  до 10 мм, при якому досягається суцільна прогартуваність, і присутність в структурі не менше 95 % мартенситу.

В групу II входять хромисті сталі марок 30Х і 40Х. Критичний діаметр  $D_{95} = 15—20$  мм. Недоліком сталей цієї групи є схильність до відпускнув крихкості другого роду. Для них потрібне швидке охолодження після відпуску.

В групу III входять хромисті сталі, які леговані додатково одним або двома елементами: 30ХМ, 40ХГ, 30ХГТ ( $D_{95} = 20—25$  мм). Для підвищення прогартуваності в хромисті сталі додатково вводять марганець (40ХГ) і бор (40ХР, 40ХГР). Молибден вводять для зниження відпускнув крихкості (30ХМ).

До цієї групи відносять сталі леговані кремнієм, які називають хромансилами: 20ХГС, 30ХГС. Ці сталі добре зварюються, мають міцність  $\sigma_s = 1200$  МПа

і ударну в'язкість  $KCU = 0,4$  МДж/м<sup>2</sup>. Недоліком сталей є схильність до відпускнуї крихкості другого роду.

Таблиця 16

**Характеристики конструкційних сталей, що поліпшуються після термообробки, ГОСТ 4543-71**

| Група | Марка сталі | Вміст елемента, % |         |           |         |                           | Поріг холодно-ламкості, $T_{90}, ^\circ\text{C}$ | Критичний діаметр, $D_{95}, \text{мм}$ |
|-------|-------------|-------------------|---------|-----------|---------|---------------------------|--|--|
|       |             | C                 | Mn      | Cr        | Ni      | інші легуючі елементи     |  |  |
| I     | 40          | 0,37—0,44         | —       | —         | —       | —                         | -20  | 10                                     |
| II    | 40X         | 0,36—0,44         | —       | 0,8—1,1   | —       | —                         | -40  | 15                                     |
| III   | 30XM        | 0,26—0,34         | —       | 0,8—1,1   | —       | 0,15—0,25 Mo              | -50  | 25                                     |
|       | 40XГ        | 0,36—0,45         | 0,9—1,2 | 0,9—1,2   | —       | —                         | -20  | 25                                     |
|       | 30XГC       | 0,28—0,35         | 0,8—1,1 | 0,8—1,1   | —       | —                         | -20  | 25                                     |
| IV    | 40XH        | 0,36—0,44         | —       | 0,45—1,75 | 1,0—1,4 | —                         | -60  | 35—40                                  |
|       | 40XHM       | 0,37—0,44         | —       | 0,6—0,9   | 1,2—1,6 | 0,15—0,25 Mo              | -70  | 50                                     |
| V     | 38XHЗМФ     | 0,30—0,42         | —       | 1,2—1,5   | 3,0—3,4 | 0,35—0,45 Mo<br>0,1—0,2 V | -100   | 100                                    |

\*В сталі 30XГC — 0,9—1,2 % Si, в інших сталях — від 0,17 до 0,37 % Si.

До групи IV відносять хромонікелеві сталі, які містять до 1,5 % Ni: 40XH, 40XHM. Їх критичний діаметр  $D_{95} = 40$  мм. Ці сталі при понижений температурі експлуатації мають більший запас в'язкості, ніж сталі попередніх груп.

До V групи відносять комплекснолеговані сталі, які містять 3—4 % Ni: 38XHЗМ, 38XHЗМФА. Критичний діаметр  $D_{95}$  складає 100 мм при низькій схильності до крихкого руйнування. Із сталей цієї групи виготовляють складні за конфігурацією деталі, що працюють при ударних навантаженнях.

### Високоміцні сталі

До високоміцних сталей відносять сталі, у яких границя міцності більше 1500 МПа. Високоміцний стан у середньо- і високовуглецевих легованих сталях досягається після гартування і низького відпуску. При цьому знижується пластичність і в'язкість сталей, тому їх використовують у тих випадках, коли за умовами роботи відсутні динамічні навантаження.

Для досягнення високоміцного стану без зниження працездатності конструкцій використовують сталі, що зміцнені термомеханічною обробкою, або такі нові високоміцні матеріали, як мартенситностаріючі сталі (МСС) і ПНП-сталі (ПНП — пластичність, наведена перетворенням).

Високоміцні мартенситностаріючі сталі характеризуються високими значеннями міцності в поєднанні з високою в'язкістю і пластичністю ( $\sigma_s = 2000$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 1200$  МПа). Зміцнення сталей досягається за рахунок мартенситного



( $\gamma \rightarrow \alpha$ )-перетворення і старіння мартенситу. Мінімальний вміст вуглецю (не більше 0,03 %) зменшує схильність цих сталей до крихких руйнувань.

Основним легуючим елементом у сталях є нікель, вміст якого складає 17—26 %. Для ефективного протікання процесу старіння мартенситу сталі додатково легують титаном, алюмінієм, молібденом, ніобієм, а також кобальтом.

Широке розповсюдження має сталь 03Н18К9М5Т, яка містить не більше 0,03 % С, 17—19 % Ni, 7—9 % Со, 4—6 % Мо, 0,5 % Ti. Сталь гартують на повітрі від температури 800—850 °С. Після гартування сталь має структуру безвуглецевого мартенситу із наступними властивостями:  $\sigma_s = 1200$  МПа;  $\sigma_{0,2} = 1000$  МПа;  $\delta = 20$  %;  $\psi = 75$  %;  $KCU = 2,0$  МДж/м<sup>2</sup>. В загартованому стані сталь добре обробляється тиском, різанням, має високу зварюваність.

Мартенситностаріюча сталь отримує основне зміцнення при відпуску в температурному інтервалі 450—500 °С. Зміцнення пов'язане з виділенням із мартенситу дисперсних частинок інтерметалідів типу Ni<sub>3</sub>Ti, NiTi, Fe<sub>2</sub>Mo, Ni<sub>3</sub>(Ti, Al). Найбільше зміцнення досягається у випадках, коли інтерметалідні фази мають малі розміри і когерентно зв'язані із твердим розчином. Легування кобальтом збільшує ефект старіння. Механічні властивості після старіння:  $\sigma_s = 2000$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 1800$  МПа,  $\delta = 12$  %,  $\psi = 50$  %,  $KCU = 0,50$  МДж/м<sup>2</sup>. При високій міцності сталь зберігає підвищений опір крихкому руйнуванню. В'язкість руйнування  $K_{Ic}$  мартенситностаріючих сталей складає 50—70 МПа·м<sup>1/2</sup>, а в звичайних легуваних сталях при такому значенні межі текучості  $K_{Ic}$  не перевищує 30 МПа·м<sup>1/2</sup>. При температурі -196 °С, сталь має наступні властивості:  $\sigma_s = 2400$  МПа,  $\delta = 10$  %,  $KCU = 0,30$  МДж/м<sup>2</sup>. Сталь 03Н18К9М5Т теплостійка до 450 °С.

Мартенситностаріючі сталі застосовують у літакобудуванні, ракетобудуванні, тобто в тих галузях, в яких важлива питома міцність, а також у криогенній техніці, де вони знайшли застосування завдяки високій пластичності і в'язкості при низьких температурах.

Високоміцні ПНП-сталі відносяться до класу аустенітних сталей. Одна із марок містить: 0,3 % С, 8—10 % Cr, 8—10 % Ni, 4 % Мо, 1—2,5 Mn, до 2 % Si. Після гартування від 1000—1100 °С і отримання при кімнатній температурі аустенітної структури (точки  $M_s$  і  $M_n$  лежать нижче 0 °С) сталь деформують при 450—600 °С. При деформації відбувається наклеп аустеніту, виділення з нього вуглецю і легуючих елементів з утворенням дисперсних карбідів, тобто дисперсійне зміцнення. Внаслідок збіднення аустеніту цими елементами точка  $M_s$  зміщується в область позитивних температур, а точка  $M_n$  лишається нижче кімнатної температури. У результаті такої обробки ПНП-сталі мають високу міцність ( $\sigma_s \geq 1800$  МПа,  $\sigma_{0,2} \geq 1400$  МПа) при високій пластичності ( $\delta \geq 30$  %).

Висока пластичність обумовлена різницею температурних рівнів початку мартенситного перетворення  $M_s$  і початку утворення мартенситу деформації  $M_d$ . Так як точка  $M_n$  нижче, а точка  $M_d$  вище кімнатної температури, то при випробуваннях на розтяг відбувається локалізація деформації, аустеніт тільки на цій ділянці перетворюється в мартенсит і зміцнюється, внаслідок чого деформація

зосереджується в сусідніх об'ємах. Перетворення аустеніту в мартенсит не дає локалізуватись деформації, шийка в зразку при випробуванні на розтяг не утворюється, завдяки чому реалізується висока пластичність сталі.

### Пружинно-ресорні сталі

Пружини та ресори призначені пом'якшувати поштовхи та удари, яким піддають конструкції у процесі роботи. Тому основними вимогами до цих сталей є високі границі пружності, витривалості, та підвищена релаксаційна стійкість зі збереженням пружних властивостей протягом тривалого часу. В ресорах і пружинах пластична деформація не допускається, тому високі значення пластичності і в'язкості менш суттєві.

Високі пружні властивості забезпечуються при вмісті 0,5—0,7 % С і отриманням трооститної структури за рахунок гартування і середнього відпуску при температурі 350—450 °С. Вуглецеві пружинні сталі після термічної обробки на троостит мають  $\sigma_{0,2} \geq 800$  МПа, леговані —  $\sigma_{0,2} \geq 1000$  МПа.

Сталі для пружин і ресор легують кремнієм і марганцем, іноді в сполученні з іншими елементами (табл. 17). Введення кремнію затримує розпад мартенситу при відпуску. Кремній і марганець зміцнюють ферит і підвищують прогартовуваність сталі.

Таблиця 17

Хімічний склад пружинних сталей, ГОСТ 4543-71

| Марка сталі | C, %      | Mn, %   | Si, %     |
|-------------|-----------|---------|-----------|
| 65          | 0,62—0,70 | 0,5—0,8 | 0,17—0,37 |
| 70          | 0,67—0,75 | 0,5—0,8 | 0,17—0,37 |
| 65Г         | 0,62—0,70 | 0,9—0,2 | 0,17—0,37 |
| 60С2        | 0,57—0,65 | 0,6—0,9 | 1,5—2,0   |
| 70С3А       | 0,66—0,74 | 0,6—0,9 | 2,4—2,8   |
| 60СГ        | 0,57—0,65 | 0,8—1,0 | 1,3—1,8   |
| 40ХФА       | 0,37—0,44 | 0,5—0,8 | 0,17—0,37 |

Середні властивості вуглецевих пружинно-ресорних сталей після термообробки:  $\sigma_{0,2} = 800—1000$  МПа,  $\sigma_s = 1000—1200$  МПа,  $\delta = 5—8$  %,  $\psi = 25—30$  %, границя витривалості при згинаючому навантаженні 500—650 МПа, в умовах кручення 300 МПа. Значення границі витривалості зменшується при наявності поверхневих дефектів і зневуглецюванні. Після дробоструменевої обробки в поверхневих шарах створюються залишкові стискуючі напруження, які підвищують витривалість. Границя втоми в результаті поверхневого наклепу зростає в 1,5—2 рази.

При легуванні пружинно-ресорних сталей кремнієм та іншими елементами міцність зростає до  $\sigma_s = 1300—1800$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 1100—1600$  МПа при  $\delta = 5—8$  %,  $\psi = 20—35$  %.



Пружини із вуглецевих, марганцевих, кремнистих сталей працюють при температурах не більше 200 °С. При нагріванні до 300 °С використовують пружини зі сталі 50ХФА, а при більш високих температурах до 500 °С із сталі 3Х2В8Ф, до 600 °С зі сталі Р18.

Для роботи в агресивних середовищах пружини виготовляють із хромистих корозійностійких сталей типу 40Х13, 95Х18.

### Підшипникові сталі

Деталі підшипників кочення (кільця, кульки, ролики) під час роботи зазнають високих змінних навантажень. Тому сталі, що використовують для їх виготовлення, мають бути міцними, зносостійкими і повинні мати високу границю витривалості. До сталей пред'являють вимоги по мінімальному вмісту неметалічних включень, карбідній неоднорідності і відсутності пористості, так як ці дефекти, знаходячись у поверхневому шарі стають концентраторами напружень і викликають передчасне втомне руйнування.

Кулькові та роликові підшипники виготовляють з високовуглецевих заєвтектоїдних сталей, що містять 0,95 — 1,15 % С, легованих Сг, що містять від 0,4—0,7 до 1,3—1,55 % Сг.

Сталі маркуються буквами «Ш» і «Х». Після букви «Х» вказують вміст Сг в десятих долях відсотка. Хімічний склад підшипникових сталей наведено в табл. 18.

Таблиця 18

Хімічний склад підшипникових сталей, ГОСТ 801-78

| Марка сталі | С, %      | Сг, %     | Мп, %     | Si, %     |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| ШХ4         | 0,95—1,05 | 0,35—0,55 | 0,15—0,30 | 0,17—0,37 |
| ШХ15        | 0,95—1,05 | 1,3—1,65  | 0,2—0,4   | 0,17—0,37 |
| ШХ15СГ      | 0,95—1,05 | 1,3—1,65  | 0,9—1,2   | 0,40—0,65 |
| ШХ20СГ      | 0,90—1,00 | 1,4—1,7   | 1,4—1,7   | 0,55—0,85 |

Сталь ШХ4 використовують для виготовлення кульок діаметром до 13,5 мм, роликів діаметром до 10 мм. Із сталі ШХ15 виготовляють кульки діаметром 22,5 мм, ролики діаметром 15 мм. Сталь ШХ15СГ використовують для виготовлення кульок діаметром до 30 мм. Для виготовлення роликів більшого діаметра застосовують сталь ШХ20СГ. Підшипники, що використовують для роботи в агресивних середовищах, виготовляють з нержавіючої сталі 95Х18.

Для деталей великогабаритних підшипників з діаметром понад 400 мм, що працюють при великих ударних навантаженнях, наприклад підшипники прокатних станів, застосовують сталь після цементування марки 20Х2Н4А. При цьому проводять глибоке цементування, отримуючи цементований шар глибиною 5—10 мм.

Термічна обробка підшипникової сталі передбачає операції відпалу, гартування та відпуску. Відпалу при температурі 780—800 °С піддають заготовки після кування з метою знизити твердість і отримати структуру дрібнозернистого перліту. Температура гартування коливається в межах 830—860 °С залежно від масивності виробів — чим більший виріб, тим вища температура гартування. Охолюють деталі в мастилі (кільця, ролики), у розчині соди або кухонної солі, у воді (кульки). Безпосередньо після гартування їх відпускають при 150—160 °С. Твердість після гартування та відпуску становить *HRC* 62—65, структура — прихованокристалічний мартенсит з рівномірно розподіленими дрібними надлишковими карбідами.

Довговічність підшипників визначається відхиленням від сферичної форми, яке призводить до биття. Ці відхилення ретельно контролюються.

### Зносостійкі сталі

До зносостійких сталей відносять сталь Гадфільда — 110Г13Л. Ця сталь є аустенітною високомарганцевою сталлю, з якої шляхом литва виготовляють деталі, що працюють в умовах зношування і ударних навантажень.

До таких деталей відносять залізничні хрестовини, траки гусеничних машин, зуби ковшів екскаваторів.

Сталь 110Г13Л вмістить 0,9—1,4 % С; 11,5—15,0 % Мп і 0,5—1,0 % Si. Після литва структура складається з аустеніту і надлишкових карбідів марганцю в залізі (FeMn)<sub>3</sub>C. При нагріванні карбіди розчиняються в аустеніті, тому після гартування від температури 1100 °С у воді сталь отримує чисто аустенітну структуру із малою твердістю *HB* 200.

Марганцевий аустеніт при ударних навантаженнях і після деформації в процесі експлуатації набуває твердість до *HRC* 50—55.

В умовах чисто абразивного зношування (наприклад при терті по піску) ефективного наклепу сталі 110Г13Л не відбувається, що приводить до підвищеного зношування деталі. Крім того, недоліком сталі є погана здатність до обробки різанням, тому деталі з неї частіше всього виготовляють литвом без механічної обробки.

Для деталей машин, що працюють в середніх умовах зношування застосовують високовуглецеві інструментальні сталі типу X12, X12M, P18, P6M5 із структурою мартенсит і карбіди.

Низько і середньовуглецеві сталі з різними видами поверхневого зміцнення застосовують для більш легких умов зношування. Зокрема, для деталей, що працюють в умовах граничного змащування (гільзи циліндрів, колінчасті вали та ін.), в яких абразивне зношування проходить одночасно з іншими видами зношування, наприклад, окислювальним. Для протистояння зносу частинками, що є продуктами зношування, деталі з низько- і середньовуглецевих сталей зміцнюють цементацією, азотуванням або поверхневим гартуванням з нагрівом струмами високої частоти. В порядку зростання зносостійкості зміцнені поверхневі шари цих сталей розміщуються в наступній послідовності: загартовані, цементовані, азотовані.

## Розділ 8

### ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ СТАЛІ І СПЛАВИ

Інструментальні сплави застосовують для виготовлення трьох основних груп інструменту: різального, вимірювального та штампів. Особливу групу інструментальних матеріалів становлять порошкові тверді сплави.

До різальних інструментів відносять: різці, свердла, мітчики, фрези, пили, протяжки тощо.

Вимірювальний інструмент слугує для перевірки розмірів готових деталей (калібри, шаблони та ін.).

Штампи використовують для деформування металу в холодному (витяжні, згинальні штампи, отворопробивні пуансони, ролики для накатування різі тощо) або в гарячому (кувальні, прошивальні, обрізні) станах.

#### 8.1. СТАЛІ І СПЛАВИ ДЛЯ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ

В процесі експлуатації різальний інструмент, що працює в умовах тривалого контакту і тертя, повинен зберігати незмінними конфігурацію і властивості різальної кромки. Тому матеріал для виготовлення різального інструменту повинен мати високу твердість понад *HRC* 60—62 і зносостійкість, тобто здатність тривалий час зберігати різальні властивості крайки.

Механічна енергія, яка затрачується на процес обробки різанням, переходить у теплову. Тепло, що виділяється, нагріває різець, деталь, стружку і частково розсіюється. Тому основною вимогою до інструментальних матеріалів є висока теплостійкість, тобто здатність зберігати твердість і різальні властивості при тривалому нагріванні в процесі роботи. За теплостійкістю розділяють три групи інструментальних сталей для різального інструменту: нетеплостійкі, напівтеплостійкі і теплостійкі.

При нагріванні до 200—300 °С нетеплостійких сталей у процесі різання вуглець виділяється з мартенситу гартування, і відбувається коагуляція карбідів цементитного типу. Це призводить до втрати твердості і зносостійкості інструменту. До нетеплостійкості відносяться вуглецеві і низьколеговані сталі, що містять 3—4 % легуючих елементів. Напівтеплостійкими сталями є деякі леговані сталі, що містять понад 4 % Cr та інших карбідотвірних елементів і зберігають твердість до температури 400 °С наприклад, 9Х5ВФ. Теплостійкі сталі зберігають твердість і зносостійкість при нагріванні до температур дещо вище 600 °С.

Вуглецеві і низьколеговані сталі мають порівняно низьку теплостійкість і невелику прогартовуваність, тому їх використовують для легких умов роботи при малих швидкостях різання. Швидкорізальні сталі, що мають вищу



теплостійкість і прогартовуваність, застосовують для важких умов роботи. Ще більш високі швидкості різання допускають тверді сплави і керамічні матеріали. Із промислових матеріалів найвищу теплостійкість має нітрид бору — ельбор. Його використання дозволяє обробляти матеріали високої твердості, наприклад загартовану сталь, при великих швидкостях різання.

Різальний інструмент різного призначення виготовляють із різних сталей.

Різці і різцеві головки: фасонні — P18, P12Ф3; довбальні, строгальні, відрізні — P6M5, P12, P9.

Свердла: для обробки металів, твердістю до *HV* 260 — P6M5, P6M3; для обробки металів більшої твердості — P12Ф3; для металів, що важко обробляються — P12Ф3, P12Ф4K5.

Фрези: різбові — P6M5, P12, P8M3, P18; черв'ячні — P6M5, P12Ф3, P12, P8M3; те саме, для різання з підвищеною швидкістю — P12Ф4K5, P8M3K6C; для різання важкооброблюваних сплавів — P12Ф4K5, P8M3K6C, P9M4K8Ф, P12M3Ф2K8, P6M5, P12, P8M3.

Протяжки діаметром, мм: до 80—100 — P12, P6M5, P12Ф3, P8M3; більше 100 — ХВСГ, P6M5.

Мітчики: машинні — P6M5, P18; ручні — 11ХФ, У11А, У12А.

Плашки круглі: для нарізання м'яких металів — ХВСГ; для нарізання твердих металів — P6M5, P8M3.

Розгортки: машинні — P6M5, P8M3, P12Ф3, P12; для важкооброблюваних сплавів — P8M3K6C; ручні — ХВСГ, P6M5, P8M3.

Зенкери: для обробки м'яких металів — P6M5, P12, P8M3; для обробки твердих металів — P9M4K8Ф, P8M3K6C.

Пили: сегменти до круглих пил і консовочні полотна машинні і ручні — P6M5; для обробки деревини — Х6ВФ, 9ХФ, У10А.

Напилки: для м'яких металів — Х, У13А; для твердих металів — P6M5, P8M3.

Стамески, долота, сокири для обробки деревини — 7ХФ, У7А.

### Вуглецеві сталі

Вуглецеві сталі — це сталі марок У7(У7А)—У13(У13А). Вихідна структура — зернистий перліт. Для отримання високої твердості *HRC* 62—63 сталі гартують у воді. Структура після гартування — мартенсит і цементит. Далі проводять низький відпуск. Висока твердість сталі зберігається при нагріванні до 200 °С. Прогартовується сталь на глибину 10—12 мм. Через низьку прогартовуваність і погану теплостійкість ці сталі застосовують для інструментів малих розмірів при невеликих швидкостях різання матеріалів із низькою твердістю.

За призначенням розділяють вуглецеві сталі для роботи при ударних навантаженнях і для інструменту, що працює без ударних навантажень.

Сталі марок У7—У9 застосовують для виготовлення інструменту при роботі з ударними навантаженнями, від якого вимагається висока різальна здатність (зубила, клейма по металу, деревообробний інструмент).

Сталі марок У10—У13 використовують для виготовлення різального інструменту, який при роботі не зазнає поштовхів, ударів і має високу твердість (напилків, шаберів, гострого хірургічного інструменту та ін.) з цих сталей іноді виготовляють прості штампи холодного деформування.

Термічна обробка вуглецевих інструментальних сталей складається із попередньої і кінцевої.

Попередня термічна обробка полягає у відпалі при 740—760 °С, мета якого — отримати мікроструктуру, що складається зі зернистого перліту. Після наступного гартування при такій вихідній мікроструктурі отримуються найбільш однорідні властивості. Кінцева термічна обробка складається із гартування і низького відпуску. Гартування проводять у воді від 780—810 °С, тобто від температур, що для доєвтектоїдних сталей лежать дещо вище  $A_{C_3}$ , а для заєвтектоїдних — нижче  $A_{Cm}$ .

У зв'язку з тим, що вуглецеві сталі мають дуже високу критичну швидкість гартування 200—300 °С/с, недопустиме найменше зниження швидкості охолодження при гартуванні. Швидкий розпад аустеніту вуглецевих сталей при проходженні температурного інтервалу 500—550 °С приводить до появи м'яких плям. Тому тільки інструменти малого діаметра після гартування у воді прогартуються наскрізь. Але при цьому у них виникають внутрішні напруження, які можуть викликати значні деформації.

Інструменти великих розмірів гартують у воді, а також водних розчинах солей, кислот і лугів, охолоджувальна здатність яких вища ніж води. Цей інструмент гартується на мартенсит лише в тонкому поверхневому шарі. Структура глибинних шарів представляє собою продукти розпаду аустеніту в перлітному інтервалі температур. Серцевина інструменту з такою структурою є менш крихкою у порівнянні з мартенситною структурою. Тому інструменти, що мають таку серцевину краще переносять поштовхи і удари у порівнянні з інструментами, загартованими наскрізь на мартенсит.

Вуглецеві інструментальні сталі відпускають при температурах не більше 200 °С, щоб не допустити зниження твердості. Твердість інструменту після кінцевого термічної обробки знаходиться в інтервалі HRC 54—64.

### Леговані сталі

Низьколеговані сталі для різального інструменту 13Х6, 9ХС використовуються для роботи при температурах не більше 200—250 °С. Середньолеговані сталі типу 9Х5ВФ, 3Х4В3М3Ф2 мають більш високу теплостійкість 300—500 °С.

Леговані інструментальні сталі мають вищу прогартуваність і зносостійкість ніж прості вуглецеві сталі. Їх гартують у мастилі, що дозволяє зменшити деформацію інструменту. Він може мати більший переріз і більшу довжину.

Низьколегована сталь 13Х використовується для виготовлення інструменту діаметром до 15 мм у зв'язку з її недостатньою прогартуваністю. Із цієї сталі виготовляють хірургічний і гравірувальний інструменти, леза бритв.

Сталі 9ХС, ХВГ, ХВСГ (табл.19) використовують для виготовлення інструментів великого перерізу — свердел, розгортки діаметром 60—80 мм.



Таблиця 19

**Хімічний склад легованих інструментальних сталей, ГОСТ 5950-73**

| Марка сталі | C, %      | Mn, %     | Si, %     | Cr, %     | W, %      | V, %      |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 9XC         | 0,85—0,95 | 0,30—0,60 | 1,2—1,60  | 0,95—1,25 | —         | —         |
| XBG         | 0,90—1,05 | 0,80—1,10 | 0,15—0,35 | 0,90—1,20 | 1,20—1,60 | —         |
| XBCG        | 0,95—1,05 | 0,60—0,90 | 0,65—1,00 | 0,60—1,10 | 0,50—1,20 | 0,15—0,30 |
| 9X5BF       | 0,85—1,00 | 0,15—0,40 | 0,15—0,40 | 4,50—5,50 | 0,80—1,20 | 0,15—0,30 |

Термічна обробка легованих інструментальних сталей включає гартування від 830—870 °C в масилі, або ступеневе гартування і відпуск при температурі 200 °C. Твердість після термообробки складає HRC 61—65.

**Швидкорізальні сталі**

Швидкорізальні сталі дозволяють збільшити швидкість різання у 3—4 рази і збільшити стійкість інструменту в 10—30 разів порівняно з іншими інструментальними сталями. Такі сталі надзвичайно теплостійкі до 600—620 °C, тобто здатні зберегти достатню твердість, зносостійкість і свої різальні властивості при підвищених температурах. Швидкорізальні сталі позначаються буквою «Р». Наступна за нею цифра вказує середній вміст вольфраму у відсотках. Сталі, що містять кобальт, молібден (понад 1 %), ванадій, маркують відповідними буквами «К», «М», «Ф» і цифрами середнього вмісту цих елементів. Вміст хрому (близько 4 % у всіх сталях) у марці не вказують.

Хімічний склад швидкорізальних сталей наведено в табл. 20.

Таблиця 20

**Хімічний склад деяких швидкорізальних сталей, ГОСТ 19265-73**

| Марка сталі | C, %      | Cr, %   | W, %      | V, %    | Mo, %   |
|-------------|-----------|---------|-----------|---------|---------|
| P18         | 0,70—0,80 | 3,8—4,4 | 17,0—18,5 | 1,0—1,4 | До 1,0  |
| P9          | 0,65—0,95 | 3,8—4,4 | 8,5—10,0  | 2,0—2,6 | До 1,0  |
| P6M5        | 0,80—0,88 | 3,8—4,4 | 5,5—6,5   | 1,7—2,1 | 5,0—5,5 |
| P6M3        | 0,85—0,95 | 3,0—3,5 | 5,5—6,5   | 2,0—2,5 | 3,0—3,6 |

Швидкорізальна сталь після гартування і відпуску має структуру високолегованого відпущеного мартенситу з карбідами. Вона зберігає початкову структуру практично незмінною при нагріванні до 600—620 °C.

Втрата твердості при нагріванні обумовлена в першу чергу розпадом мартенситу і коагуляцією карбідів, що виділяються при розпаді. Коагуляція карбідів у вуглецевій і легованій сталях при температурах вище 300 °C веде до швидкої



втрата твердості. Теплостійкість швидкорізальних сталей обумовлена легуванням їх карбідотвірними елементами — вольфрамом, ванадієм і молібденом у кількостях, які достатні для зв'язування майже всього вуглецю в спеціальні карбіди. Розпад мартенситу і коагуляція спеціальних карбідів відбувається при температурах 600—650 °C.

При затвердінні литої швидкорізальної сталі утворюється евтектика, яка нагадує ледебурит і розміщується по межах зерен. Швидкорізальні сталі відносяться до ледебуритного класу. Кування або прокатування використовують для усунення сітки евтектики, подрібнення карбідів, що входять в її склад, і їх рівномірного розподілу в основній матриці.

Після обробки тиском для швидкорізальної сталі проводять ізотермічний відпал, що забезпечує зменшення твердості і полегшення механічної обробки. Сталь витримують при 740 °C до повного перетворення аустеніту в ферито-цементитну суміш сорбіт або перліт.

Високу теплостійкість інструмент із швидкорізальних сталей набуває після гартування і багаторазового відпуску. При нагріванні під гартування необхідно забезпечити максимальне розчинення карбідів і отримання високолегованого аустеніту. Така структура збільшує прогартуваність і дозволяє отримати після гартування мартенсит з високою теплостійкістю. Температура гартування складає для сталі P18 — 1270—1290 °C, P9 — 1220—1240 °C, P6M5 — 1210—1230 °C. Для уникнення утворення тріщин і деформації інструменту за рахунок низької теплопровідності сталей застосовують ступеневий нагрів під гартування в розплавлених солях, а гартування проводять у мастилі.

Після гартування структура швидкорізальної сталі складається з високолегованого мартенситу, що містить 0,3—0,4 % C, нерозчинених при нагріванні надлишкових карбідів і біля 30 % залишкового аустеніту. Залишковий аустеніт знижує твердість, різальні властивості сталі, погіршує її здатність до шліфування і його присутність у структурі є небажаною.

При багаторазовому відпуску із залишкового аустеніту виділяються дисперсні карбіди, легуваність аустеніту зменшується і він перетворюється в мартенсит. У більшості випадків застосовують триразовий відпуск при 550—570 °C протягом 45—60 хв. (рис. 73). Число відпусків може бути скорочено при обробці холодом після гартування, у результаті якої зменшується вміст залишкового аустеніту. Обробленню холодом піддають інструменти простої форми. Твердість після гартування *HRC* 62—63, а після відпуску вона збільшується до *HRC* 63—65.

Для виготовлення інструменту із швидкорізальних сталей застосовують порошки. Вихідний матеріал представляє собою тонко подрібнену стружку швидкорізальної сталі, яку формують у холодному стані з наступним спіканням зформованих заготовок. Спікання проводять у вакуумі при температурі 1200—1250 °C протягом 3—5 годин. Для зменшення пористості порошкову швидкорізальну сталь піддають гарячому штампуванню або гарячому пресуванню. Після цього виріб піддають термічній обробці, яка характерна для даної марки сталі.

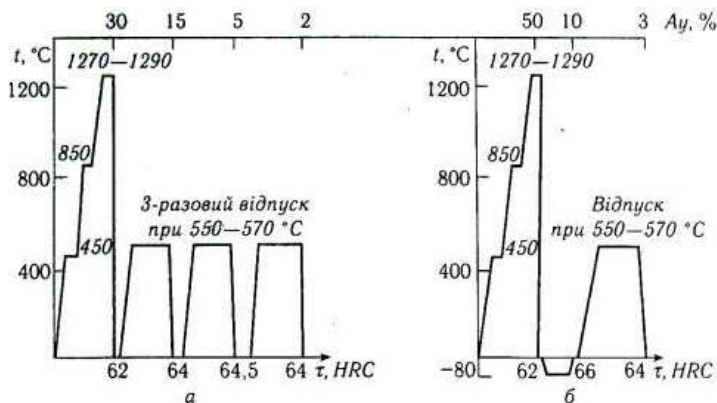


Рис. 73. Режими термічної обробки інструменту із швидкорізальної сталі P18:

а — гартування і трьохразовий відпуск;  
б — гартування, обробка холодом, відпуск

Порошкова швидкорізальна сталь має більш високу теплостійкість, ніж сталь, яка виготовлена традиційними методами, і, як наслідок, більш високу зносостійкість. Це пояснюється більш високим легуванням аустеніту елементами, що входять до складу сталі, дрібнодисперсною структурою і рівномірним розподілом карбідної фази. В структурі порошкової швидкорізальної сталі відсутня карбідна неоднорідність. Стійкість швидкорізальної сталі, виготовленої методом порошкової металургії, у 1,5—2 рази вища за стійкість швидкорізальної сталі, отриманої традиційними методами.

### Металокерамічні тверді сплави

Металокерамічні тверді сплави є інструментальними матеріалами, які складаються із карбідів тугоплавних металів і кобальту, який виконує роль зв'язувального компонента. Тверді сплави характеризуються найвищою твердістю і зберігають її при нагріванні до високих температур (рис. 74).

Тверді сплави виготовляють методом порошкової металургії. Застосовують карбіди вольфраму, титану і танталу, а також ніобію і ванадію. Сплави отримують спіканням порошків карбідів з порошком кобальту, який є зв'язувальним компонентом, при 1400—1550 °C після попереднього пресування.

Тверді сплави виготовляють у вигляді пластин, які мідним припоєм припаюють до держака із звичайної вуглецевої сталі. Тверді сплави застосовують для різців, свердл, фрез та іншого інструменту.

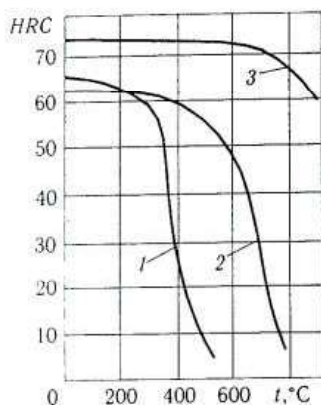


Рис. 74. Залежність твердості інструментальних матеріалів від температури випробування:

- 1 — вуглецева сталь;
- 2 — швидкорізальна сталь;
- 3 — твердий сплав

мають найбільшу міцність, але більш низьку твердість, ніж сплави інших груп. Вони теплостійкі до 800 °C. Їх застосовують для обробки чавуну, сплавів кольорових металів і різних неметалічних матеріалів, що дають стружку, яка переривається.

Сплави другої групи (двокарбідні) виготовляють на основі карбідів WC і TiC і кобальтової зв'язки. Їх маркують буквами «Т», «К» і цифрами. Цифри після букви «Т» вказують вміст карбідів титану у відсотках, а цифри після букви «К» — вміст Со. Наприклад, сплав Т15К6 містить 15 % TiC, 6 % Со, решта, тобто 79 % WC. Карбід вольфраму розчиняється в карбіді титану при температурі спікання, утворюючи твердий розчин (Ti, W)C, який має більш високу твердість ніж WC. Сплави цієї групи мають більш високу теплостійкість до 900—1000 °C, яка зростає зі збільшенням вмісту карбідів титану. Їх в основному застосовують для високошвидкісної обробки сталей.

Для виготовлення сплавів третьої групи використовують карбіди вольфраму, титану, танталу і порошок кобальту як зв'язуючий компонент. Ці сплави маркують буквами «ТТК» і цифрами. Цифра, що стоїть після букв «ТТ», вказує сумарний вміст карбідів титану TiC і тантану TaC, а цифра, що стоїть після букви «К» — вміст кобальту. Наприклад, у сплаві ТТ7К12 міститься 4 % TiC, 3 % TaC, 12 % Со і 81 % WC. В структурі сплаву присутні карбіди, які є твердим розчином (Ti, Ta, W)C і надлишкові карбіди WC. Сплави цього типу мають більш високу міцність, ніж сплави другої групи і кращий опір ударним навантаженням, вібрації

Інструменти із металокерамічних твердих сплавів характеризуються високою твердістю HRA 80—97, зносостійкістю у поєднанні з високою теплостійкістю до 800—1000 °C. Їх недоліком є висока крихкість.

Швидкість різання твердими сплавами у 5—10 разів вища швидкості різання швидко-різальними сталями.

В залежності від складу карбідної основи розрізняють три групи твердих сплавів: вольфрамові, титанвольфрамові і титантантал-вольфрамові.

Вольфрамові тверді сплави виготовляють на основі карбіду вольфраму WC і Со. Сплави цієї групи називають однокарбідними і позначають буквами «ВК» і цифрою, що вказує вміст Со у відсотках. Наприклад, сплав ВК2 містить 2 % Со і 98 % WC. Вміст Со може змінюватись (сплави ВК6, ВК8, ВК10). Чим більший вміст Со, тим вища міцність, хоча і дещо нижчою є твердість сплаву. Тверді сплави вольфрамової групи



і викришуванню. Їх застосовують для більш важких умов різання (чорнове точення сталевих зливків, поковок, виливків).

Загальним недоліком сплавів, що розглядаються, крім високої крихкості є підвищена дефіцитність вихідної вольфрамової сировини — основного компонента, який визначає їх підвищені фізико-механічні характеристики. Тому перспективним напрямком є використання безвольфрамових твердих сплавів. Добре себе зарекомендували сплави, в яких основою є карбід титану, а як зв'язувальний компонент — Ni і Mo. Вони маркуються буквами KTC і TH. Тверді сплави KTC-1 і KTC-2 містять 15—17 % Ni і 7—9 % Mo відповідно, решта — TiC. В твердих сплавах типу TH-20, TH-25 і TH-30 як зв'язувальний компонент застосовується нікель в кількості 16—30 %. Концентрація молібдену складає 5—9 %, решта — також карбід титану. Твердість подібних сплавів складає HRA 87—94, сплави мають високу зносостійкість і опір корозії. Їх використовують для виготовлення різального інструменту і швидкорізальних деталей технологічного обладнання.

Особливо тверді інструментальні матеріали створені на основі нітриду бору і нітриду кремнію. В них відсутня пластична металева зв'язка. Вироби з цих матеріалів виготовляють або за допомогою вибуху, або в умовах надвисоких тисків і високих температур. Вироби з нітридів бору і кремнію використовують як матеріал інденторів (наконечників) для вимірювання твердості тугоплавких матеріалів у інтервалі температур 700—1800 °C, абразивного матеріалу, а також як сировину для виготовлення надтвердих матеріалів, що застосовуються для оснащення різальної частини інструментів, якими обробляють загартовані сталі, тверді сплави, склопластики, кольорові метали. Вони мають високу твердість HRA 94—96, міцність, зносостійкість, теплопровідність, високу стабільність фізичних властивостей і структури при підвищенні температури до 1000 °C. Їх перевагою є доступність і низька ціна, завдяки чому їх використовують для заміни твердих сплавів із вольфрамом.

Для виготовлення полірувальних паст і шліфувальних кругів застосовують абразивні матеріали. Вони являють собою порошки, скріплені зв'язкою або нанесені на гнучку основу — тканину або папір. Абразивні матеріали є природні і штучні. До природних відносять алмази, гранати, корунди; до штучних — штучні алмази, гексагональний нітрид бору (ельбор), карборунд.

### Сталі та сплави для деревообробного інструменту

Вуглецеву інструментальну сталь У7, У8, У9, У10 застосовують для інструменту, який працює під невеликим навантаженням на малих швидкостях (ручний різальний інструмент). З вуглецевої високоякісної інструментальної сталі У7А, У8А, У9А, У10А виготовляють верстатний різальний інструмент.

Легована інструментальна сталь призначена для інструментів, що працюють на високопродуктивних верстатах і інструментів спеціального призначення (пили, ножі, фрези зі вставними різцями тощо).

Марки деяких легованих інструментальних сталей: 65ХВ, ХВГ, ХВСГ, 9Х5ВФ, 9ХС, Х12М.

Швидкорізальна сталь — матеріал переважно металорізального інструменту, проте з неї виготовляють і деревообробний інструмент, який інтенсивно нагрівається (різці токарно-котушкових автоматів, ножі високопродуктивних стругальних верстатів тощо), та інструменти для обробки склеєних деталей. Серед цих сталей слід відзначити сталь Р18 нормальної продуктивності.

Литі тверді сплави (стеліти, сормайти) займають проміжне положення між швидкорізальними сталями та твердими сплавами. Стеліти застосовують у вигляді наплавки на різальну частину інструмента автогенним або дуговим зварюванням. Зносостійкість такого інструменту в 2—3 рази вища, ніж в інструменту з швидко-різальної сталі.

Марки стелітів: В2К містить 32 % Сг, 15 % W, 45 % Со та ін. і В3К містить 29 % Сг, 4 % W, 60 % Со та ін.

Зносостійкість дискових пил, наплавлених сормайтом, у 4—5 разів вища порівняно зі зносостійкістю легованої сталі 85ХФ. Марки сормайтів: № 1 містить 30 % Сг, 32 % Fe та ін., № 2 містить 15 % Сг, 81 % Fe та ін.

Порошкові тверді сплави застосовують в основному для обробки шаруватих пластиків та інших клеєних матеріалів з дерева, де клейовий прошарок діє як абразивний матеріал, швидко затуплює лезо інструментів з цієї сталі. Марки порошкових твердих сплавів, що застосовуються для виготовлення дереворізальних інструментів: ВК6 містить 94 % WC, 6 % Со, ВК8 містить 92 % WC, 8 % Со, ВК10 містить 90 % WC, 10 % Со, ВК15 містить 85 % WC, 15 % Со, ВК20 містить 80 % WC, 20 % Со.

Виготовляють дереворізальні інструменти також із мінералокерамічних пластинок. Вони являють собою пресований матеріал з корундових зерен  $Al_2O_3$ , наприклад ЦМ322. Зносостійкість таких пластинок порівняно з легованою сталлю більша у 5—6 разів. Проте вони надто крихкі, тому широкого застосування у практиці деревообробки не знайшли.

Вибір марки сталі для дереворізального інструменту залежить від умов роботи.

**Пили.** Пили виготовляють з легованих сталей 9ХФ або 65ХФ, а вузькі столярні пили також з інструментальної вуглецевої сталі.

**Ножі.** Ножі поздовжньо-фрезерних верстатів виготовляють переважно зі сталей 9Х5ВФ, 85Х4В4Ф.

**Фрези.** Фрези для високопродуктивних верстатів і для обробки твердих порід дерева виготовляють зі сталей Х12Ф, Х6ВФ. Для кінцевих фрез рекомендують сталі Р9, Р9Ф2КТ або Х12Ф.

**Свердла.** Свердла для неглибоких отворів роблять переважно зі сталі У9А—У10А. Свердла для свердління твердих порід шаруватої пресованої деревини, фанери або висвердлювання сучків виготовляють зі сталей Х5ВФ, 9ХС, швидкорізальної сталі Р9 або пластинок — із твердих сплавів.



*Довбальні (гніздоутворювальні) інструменти.* Квадратні долота виготовляють зі сталі У7А—У8А, для обробки твердих порід — зі сталі 85ХФ, гніздові довбальні фрези — зі сталі 9ХФ.

*Токарні різці.* Для токарних різців застосовують сталі У8А—У10А; для високопродуктивних токарних автоматів типу катушкових — сталі Х12, Х12Ф, Р9 або Р9Ф2К5. Сталь Х12Ф є замінником сталі Р18. Ручний різальний інструмент для рубанкових залізок, стамесок, доліт, бурів, центрових свердел звичайно виготовляють з якісної вуглецевої сталі У7—У8.

## 8.2. СТАЛІ ДЛЯ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ

Сталі цього призначення повинні мати високу твердість і зносостійкість, зберігати постійність форми і розмірів протягом терміну експлуатації. Крім того, вони повинні мати високу оброблюваність різанням для отримання високого класу чистоти поверхні і незначну деформацію при термічній обробці.

Для вимірювального інструменту в більшості випадків застосовують високовуглецеві сталі У8—У12 і низьколеговані сталі марок Х, ХВС, ХВГ, 9ХС, що містять біля 1 % С і до 1,5 % Сг. Їх твердість після термообробки повинна бути не менше *HRC* 60—64.

Після термічної обробки в структурі високовуглецевих сталей присутній залишковий аустеніт, що обумовляє їх нестабільність. Для забезпечення високої твердості сталі і стабільності розмірів інструменту в процесі експлуатації проводиться спеціальна термічна обробка. Вона складається із гартування в масилі. Для інструментів підвищеної точності застосовують додаткову обробку холодом при температурі  $-80^{\circ}\text{C}$  і тривалий до 30 год низькотемпературний відпуск — старіння при  $120-170^{\circ}\text{C}$ . Нагрівання до більш високої температури є недопустимим за рахунок зниження твердості і зносостійкості інструменту. Тривалий відпуск запобігає процесам старіння і розпаду мартенситу під час терміну експлуатації інструменту. Для вимірювального інструменту великого розміру і складної геометрії використовують сталі, що азотуються, типу 38Х2МЮА.

## 8.3. ШТАМПОВІ СТАЛІ

Штампові сталі застосовують для виготовлення штампів холодного і гарячого деформування, пуансонів, матриць, фільєр, прес-форм для литва під тиском. Хімічний склад деяких з них наведено у табл. 21.

В залежності від температурних умов експлуатації розділяють штампові сталі для деформування в холодному і гарячому стані.



## Хімічний склад штампових сталей, ГОСТ 5950-73

| Марка сталі                               | C, %      | Si, %     | Mn, %     | Cr, %     |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <i>Для деформування в холодному стані</i> |           |           |           |           |
| X6BΦ                                      | 1,05—1,15 | 0,15—0,35 | 0,15—0,40 | 5,5—6,5   |
| X12                                       | 2,0—2,20  | 0,15—0,35 | 0,15—0,40 | 11,5—13,0 |
| X12M                                      | 1,45—1,65 | 0,15—0,35 | 0,15—0,40 | 11,0—12,5 |
| X12Φ1                                     | 1,25—1,45 | 0,15—0,35 | 0,15—0,40 | 11,0—12,5 |
| Марка сталі                               | W, %      | V, %      | Mo, %     | Ni, %     |
| X6BΦ                                      | 1,1—1,5   | 0,5—0,8   | —         | —         |
| X12                                       | —         | —         | —         | —         |
| X12M                                      | —         | 0,15—0,3  | 0,4—0,6   | —         |
| X12Φ1                                     | —         | 0,7—0,9   | —         | —         |
| Марка сталі                               | C, %      | Si, %     | Mn, %     | Cr, %     |
| <i>Для деформування в гарячому стані</i>  |           |           |           |           |
| 7X3                                       | 0,65—0,75 | 0,15—0,35 | 0,15—0,40 | 3,2—3,8   |
| 5XHM                                      | 0,50—0,60 | 0,15—0,35 | 0,50—0,80 | 0,5—0,8   |
| 4XMFС                                     | 0,37—0,45 | 0,50—0,80 | 0,50—0,80 | 1,5—1,8   |
| 3X2B8Φ                                    | 0,30—0,40 | 0,15—0,40 | 0,15—0,40 | 2,2—2,7   |
| Марка сталі                               | W, %      | V, %      | Mo, %     | Ni, %     |
| 7X3                                       | —         | —         | —         | —         |
| 5XHM                                      | —         | —         | 0,15—0,3  | 1,4—1,8   |
| 4XMFС                                     | —         | 0,3—0,5   | 0,9—1,2   | —         |
| 3X2B8Φ                                    | 7,5—8,5   | 0,2—1,2   | —         | —         |

\*Вміст S і P повинен бути менше 0,03% у всіх сталях.

## Сталі для штамів холодного деформування

Сталі цього типу повинні мати високу твердість і зносостійкість, високу міцність і задовільну в'язкість для роботи при ударних навантаженнях. У залежності від призначення, штампові сталі для деформування в холодному стані поділяють на три групи.

До першої групи відносяться сталі для витяжних і вирубних штамів. Основні вимоги до цих сталей — висока твердість і зносостійкість. Для виготовлення штамів цього типу застосовують вуглецеві сталі марок У10—У12 і низьколеговані сталі X, XBГ, XBСГ. Після неповного гартування їх відпускають

при 150—180 °С на твердість *HRC* 60. У результаті несуцільної прогартованості, на поверхні утворюється твердий зносостійкий шар, порівняно в'язка серцевина, що дозволяє працювати штампу при помірних ударних навантаженнях.

Сталі із підвищеним вмістом 6—12 % Сг, такі як Х6ВФ, Х12, Х12М, Х12Ф1 мають більш високу зносостійкість і глибоку прогартовуваність. Висока твердість цих сталей обумовлена присутністю в структурі великої кількості карбідів хрому Сг<sub>7</sub>С<sub>3</sub>. Але підвищений вміст Сг приводить до зростання карбідної неоднорідності. Структура і властивості високохромистих сталей у значній мірі визначаються правильним вибором режиму термічної обробки, особливо температури гартування. З її збільшенням зростає концентрація С і Сг в аустеніті, що спричиняє підвищення твердості мартенситу. Але при гартуванні з надто високою температурою в структурі зростає вміст залишкового аустеніту, і твердість сталі падає (рис. 75). Після гартування проводять низький відпуск на твердість *HRC* 61—63.

Високі властивості мають сталі Х12Ф4М, Х6Ф4М. Мо і V, додатково введені в склад сталей, сприяють отриманню дрібнозернистої структури. Зносостійкість штампів із сталі Х12Ф4М у 1,5—2 рази вища зносостійкості штампів зі сталі Х12М.

Другу групу складають сталі для штампів холодного видавлювання, які працюють в умовах великих тисків. Ці сталі повинні мати високий опір деформації і високу міцність. Присутність у структурі залишкового аустеніту є недопустимим. Для його усунення проводять високий відпуск при температурах вище 500 °С. Хоча із цих сталей виготовляють штампи для холодного деформування, вони мають високу теплостійкість, зокрема сталь 6Х4М2ФС.

До третьої групи відносять сталі з яких виготовляють штампи, що працюють при високих ударних навантаженнях (наприклад, штампи для операцій висадки і карбування). Складність створення таких сталей полягає в тому, що для підвищення твердості необхідно збільшити вміст вуглецю, що приводить до зниження ударної в'язкості. У більшості випадків для цих штампів використовують сталі 7Х3 і 6Х3ФС, які мають вищу стійкість.

### Сталі для штампів гарячого деформування

Штампіві інструменти для гарячого формоутворення працюють у важких умовах. Матеріал штампів контактує з гарячим металом і нагрівається, причому нагрівання чергується з охолодженням.

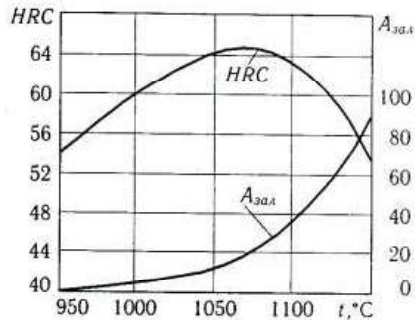


Рис. 75. Залежність твердості і кількості залишкового аустеніту в сталі Х12Ф1 від температури гартування

Матеріал для гарячих штамів повинен задовільняти комплексу вимог. До них відносять високу міцність не менше 1000 МПа і теплостійкість, яка дозволяє зберегти твердість і міцність при тривалій температурній дії. Сталі повинні мати також високу в'язкість, щоб запобігти руйнуванню при ударному навантаженні, і опір термічній втомі, тобто здатність витримувати багаторазові нагрівання і охолодження без утворення сітки тріщин. Сталі повинні бути окалиностійкими і мати високу прогартуваність.

У відповідності зі вказаними вимогами для штамів гарячого формоутворення використовують леговані сталі, що містять 0,3—0,6 % С. Вони піддаються гартуванню і відпуску при 550—680 °С з метою отримання трооститної і трооститно-сорбітної структури.

Для молотових штамів застосовують сталь 5ХНМ і її аналоги: 5ХНВ, 5ХНТ, 5ХГМ. Після гартування і відпуску при 550 °С сталь 5ХНМ при кімнатній температурі має наступні механічні властивості:  $\sigma_b = 1200\text{—}1300$  МПа,  $\delta = 10\text{—}12$  %,  $KCU = 0,4$  МДж/м<sup>2</sup>. При нагріванні до 500 °С  $\sigma_b = 850\text{—}900$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 600\text{—}650$  МПа. При температурах експлуатації вище 500 °С стійкість інструменту зі сталі 5ХНМ різко падає.

Добре зарекомендували себе на машинобудівних заводах сталі 4ХМФС, 5Х2СФ і 4ХСНМЦР. Впровадження цих сталей замість 5ХНМ для штампування вуглецевих і низьколегованих сталей підвищує стійкість інструменту в 2—3 рази. Для виготовлення великогабаритних пресових і молотових штамів застосовують сталь 5Х2НМФС, що забезпечує підвищення стійкості інструменту більше ніж у два рази.

Для прес-форм литва під тиском і пресування кольорових металів і сплавів до останнього часу використовували сталь 3Х2В8Ф. Її недоліком є низька технологічність, що обмежує можливості її застосування для виготовлення інструменту значних розмірів. Крім того сталь 3Х2В8Ф чутлива до ударних навантажень і містить значну кількість дорогого і дефіцитного вольфраму.

Для виготовлення прес-форм литва під тиском мідних і алюмінієвих сплавів, а також виготовлення прес-шайб і внутрішніх втулок контейнерів при пресуванні сплавів застосовують сталь 3Х2М2Ф. Використання цієї сталі дозволяє підвищити стійкість інструменту в 1,5—3 рази.

Для виготовлення прес-штамів, втулок контейнерів і матриць великих розмірів на заводах застосовують сталі 3ХВ4СФ і 4ХСН2МВФ.

В умовах роботи при температурах 700—800 °С використовують інструмент, який виготовляється із сталей нового класу, що мають аустенітне перетворення, яке регулюється при експлуатації. Прикладом такої сталі є сталь 4Х2Н5М3К5Ф, яка має технологічні переваги сталей на феритній основі, а також високу експлуатаційну стійкість характерну для жароміцних аустенітних сталей і сплавів.

Для підвищення твердості при високих температурах використовують хіміко-термічну обробку: азотування, дифузійне хромування, борування. У деяких випадках на поверхнях гравірують штамів із газової фази проводять осаджування карбідів титану, що мають особливо високу твердість.



СТАЛІ ТА СПЛАВИ З ОСОБЛИВИМИ ФІЗИЧНИМИ  
ВЛАСТИВОСТЯМИ

## 9.1. МАГНІТНІ СТАЛІ ТА СПЛАВИ

Основними характеристиками магнітних сталей і сплавів є такі магнітні властивості: залишкова магнітна індукція  $B_r$  (у Т); коерцетивна сила  $H_c$  (в А/м) і магнітна проникливість  $\mu = B/H$  (Г/м), де  $B$  — число магнітних силових ліній, що проходять через  $1 \text{ м}^2$  перерізу зразка;  $H$  — напруженість магнітного поля, намагнічувальна сила.

Якщо магнітна проникливість більша від одиниці, то такі тіла називаються парамагнетиками, якщо менше одиниці — діамагнетиками. Окремим випадком парамагнетних тіл є феромагнітні тіла — залізо, нікель і кобальт, магнітна проникливість яких набагато більша, ніж у інших парамагнітних тілах.

Залишкову індукцію  $B_r$  і коерцетивну силу  $H_c$  характеризують кривою намагнічування (петля гістерезису, рис. 76). Під час намагнічування феромагнітних матеріалів магнітна індукція  $B$  з підвищенням напруженості магнітного поля  $H$  змінюється по кривій  $OA$ . Якщо параметр  $H$  зменшити, то магнітна індукція спадатиме не по кривій  $OA$ , а більш повільно — по кривій  $AC$  — і повністю не зникне. Магнітну індукцію  $CO = B_r$ , що залишилася, називають залишковою. Залишковий магнетизм знижується зі зміною напрямку намагнічувального струму внаслідок дії певного негативного поля —  $H = OD$ . Негативне поле  $OD = H_c$  називають коерцетивною силою.

Якщо після досягнення максимального негативного значення  $B$  і  $H$  (точка  $E$ ) змінювати  $H$  у зворотному напрямку, то параметри  $H$  і  $B$  змінюватимуться по кривій  $EA$  і врешті-решт утвориться гістерезисна петля.

Магнітні сплави залежно від значень коерцетивної сили і магнітної проникності ділять на магнітотверді — сплави з великою

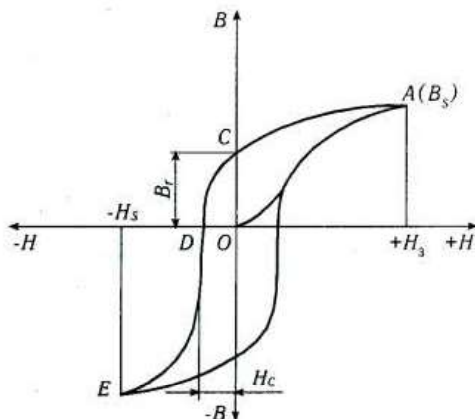


Рис. 76. Петля гістерезису феромагнетика

коерцитивною силою  $H_c > 4$  кА/м і низькою магнітною проникністю (їх застосовують для постійних магнітів) і магнітом'які, для яких характерна мала коерцитивна сила  $H_c < 4$  кА/м і висока магнітна проникність (трансформаторна і динамо-сталі).

### Магнітотверді сталі та сплави

Такими матеріалами є високовуглецеві сталі, леговані сталі та спеціальні сплави. Щоб коерцитивна сила  $H_c$  була високою, сталі повинні мати нерівномірну структуру, звичайно — мартенсит зі значною кількістю дефектів будови (дислокацій, блоків, меж зерен тощо), які спричиняють внутрішні напруження і спотворення кристалічної решітки.

Вуглецеві сталі У10—У12 після гартування мають досить високу коерцитивну силу  $H_c = 4,8$ — $5,2$  кА/м, проте вони прогартовуються на невелику глибину, тому їх застосовують для виготовлення магнітів перерізом 4—7 мм.

Хромисті сталі ЕХ, ЕХЗ порівняно з вуглецевими прогартовуються значно глибше, тому з них виготовляють дещо більші магніти. Магнітні властивості цих сталей такі самі, як і вуглецевих. Хромокобальтові сталі, наприклад ЕХ5К5, мають кращі магнітні показники:  $H_c \geq 8$  кА/м.

Спеціальні Fe—Ni—Co магнітні сплави, зокрема сплав ЮНДК40Т8АА містить 14 % Si, 7,5 % Al, 40 % Co, 3,5 % Cu, 7,5 % Ti, 0,25 % Si, характеризується надзвичайно високою коерцитивною силою  $H_c = 144$  кА/м, що дозволяє виготовляти з них сильні магніти невеликих розмірів. Їх називають сплави «альніко» і маркують тими ж буквами, що і сталі. Букви в кінці марки характеризують структуру сплаву: БА — означає, що сплави мають стовпчасту структуру, АА — монокристалічну структуру.

Магнітні сплави дуже тверді, але крихкі й обробляються тільки шліфуванням і електроерозійним способом. Магніти з цих сплавів виготовляють литтям або спіканням з порошку.

### Магнітом'які сталі та сплави

До них відносять: електротехнічне залізо (армко-залізо), електротехнічну сталь, залізонікелеві сплави (пермалой) і ферити. Електротехнічне залізо або низьковуглецева тонколистова сталь марок Э, ЭА, ЭАА\* містить не більше 0,4 % С, має високу магнітну проникність і малу коерцитивну силу:  $H_c = 64$ — $96$  А/м. Застосовують його для виготовлення осердь, полюсних наконечників електромагнітів тощо.

Електротехнічна сталь містить до 4,8 % Si. Розчиняючись у фериті, Si сильно спотворює кристалічну решітку і тим самим істотно збільшує магнітну проникність і знижує коерцитивну силу.

Набагато кращі магнітні властивості в крупнозернистій листовій електротехнічній сталі з розташуванням зерен переважно вздовж листа.

Марки електротехнічної гарячекатаної сталі за вмістом Si ділять на чотири групи: низьколеговану 0,8 %—1,8 % — Э11, Э12, Э13; середньолеговану 1,8 %—

\* Э, ЭА, ЭАА — позначення російською мовою

2,8 % — Э21, Э22; підвищенолеговану 2,8%—3,8% — Э31, Э32; високолеговану 3,8 %—4,8 % — Э41—Э48.

Перша цифра у позначенні вказує на середній вміст Si %, друга — гарантовані електричні та магнітні показники. Сталі групи Э1 і Э2 називають динамними, а сталі групи Э3 і Э4 — трансформаторними. Динамічні сталі містять менше кремнію, тому порівняно з трансформаторними пластичніші, проте менш магнітом'які.

Трансформаторна сталь відноситься до феритного класу сталей і має високі магнітні характеристики, хоча більш крихка.

Залізонікелеві сплави (пермалой) містять 45, — 80 % Ni, і їх додатково легують Cr, Si, Mo. Магнітна проникність у цих сплавах дуже висока. Найкращі властивості має пермалой марки 79НМ, що містить 79 % Ni, 4 % Mo. Пермалой використовують в апаратурі, що працюють у слабких магнітних полях (апаратура зв'язку).

Ферити — магнітом'які матеріали, які отримують змішуванням порошків оксиду заліза  $Fe_2O_3$  і оксидів двовалентних металів ZnO, NiO, MgO та ін. У феритів дуже високий питомий електричний опір  $\rho = 10^{10}$  Ом·м, що визначає їх застосування в пристроях, які працюють в області високих і надвисоких частот.

## 9. 2. СПЛАВИ ІЗ ЗАДАНИМ КОЕФІЦІЄТОМ ТЕПЛОВОГО РОЗШИРЕННЯ

Сплави містять велику кількість нікелю. Сплав 36Н (інвар) майже не розширюється в інтервалі температур від  $-60$  до  $+100$  °С, тобто його коефіцієнт теплового розширення в цьому інтервалі близький до нуля. Інвар застосовують для деталей приладів, які не повинні змінювати своїх розмірів у межах кліматичних перепадів температур (геодезичні прилади, маятники хронометрів, еталони довжини). *Інвар* — це сплав Fe — Ni, який містить 0,5 % С і 36 % Ni. Сплав 29НК (ковар) має коефіцієнт теплового розширення в інтервалі температур від  $-70$  до  $+420$  °С такий, як у скла. З нього виготовляють деталі, які впаюють у скло при створенні вакуумно-щільних спаїв, наприклад, у телевізійних кінескопах. *Ковар* — це сплав на основі Fe, який містить 29 % Ni і 18 % Co.

Залежність розширення металу від температури має криволінійний характер (рис. 77). Коефіцієнт лінійного розширення  $\alpha$  залізонікелевих сплавів зі збільшенням кількості нікелю змінюється досить складно (рис. 78). Виявляється, що у заліза коефіцієнт лінійного розширення  $\alpha = 11,3 \cdot 10^{-6}$ . Сплав з 25% Ni

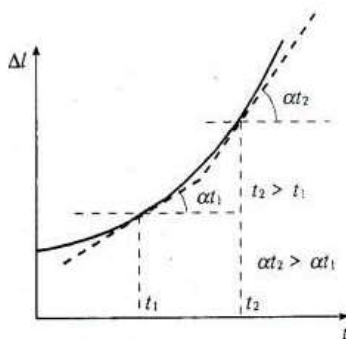


Рис. 77. Приріст довжини  $\Delta l$  сплавів при підвищенні температури



має вже в два рази більший коефіцієнт лінійного розширення  $\alpha = 20 \cdot 10^{-6}$ , а сплав з 36% Ni — у вісім разів менший  $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-6}$ .

Цікавою є й температурна залежність коефіцієнта лінійного розширення залізонікелевих сплавів (рис. 79).

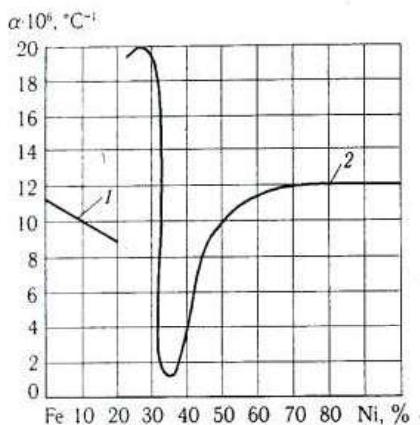


Рис. 78. Залежність коефіцієнта лінійного розширення від вмісту нікелю в залізонікелевих сплавах:  
1 —  $\alpha$ -фаза; 2 —  $\gamma$ -фаза

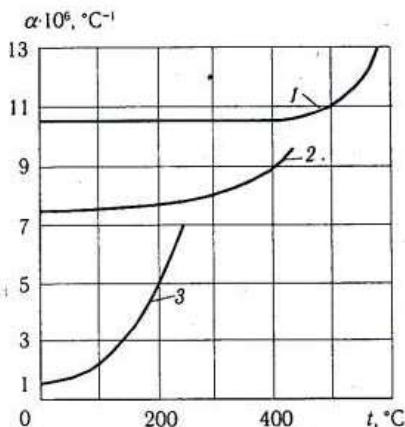


Рис. 79. Температурна залежність коефіцієнта розширення сплавів Fe—Ni.  
Вміст Ni:  
1 — 50 %; 2 — 42 %; 3 — 36 %

### 9.3. СПЛАВИ З ВИСОКИМ ЕЛЕКТРИЧНИМ ОПОРОМ

Сплави з високим електричним опором застосовують для виготовлення нагрівальних елементів і реостатів (реостатні сплави). Метали для нагрівальних елементів мають бути жаростійкими, повинні мати високий електричний опір і задовільну пластичність у холодному стані. Цим вимогам відповідають залізохромоалюмінієві сплави, наприклад марок Х15Н60 — фероніхром, Х20Н60 — ніхром. Жаростійкість нагрівачів із залізохромоалюмінієвих сплавів вища, ніж із ніхромів. Сплави Х13Ю4, Х15Н60, Х20Н80 у вигляді дроту і стрічки застосовують для побутових приладів, а також для промислових і лабораторних печей — сплав ОХ23Ю5.

Матеріали для реостатів повинні мати високий електричний опір, малий температурний коефіцієнт опору в області високих температур і незмінні в часі електричні властивості. Даним вимогам відповідають мідно-нікелеві сплави МНМц 3-12 (манганін) і МНМц 40-1,5 (константан).

Усі сплави з високим опором відносяться до твердих розчинів.

## Розділ 10

### ПОРОШКОВІ СПЛАВИ

Сплави, отримані з металевого порошку шляхом пресування і спікання, називають порошковими, а спосіб їх утворення — порошковою металургією. Іноколи такі сплави порівнюють з металокерамічними, оскільки вони надто вже схожі з керамічними виробами за технологією виготовлення.

Порошкова металургія дає змогу створювати матеріали з особливими властивостями, чого ніяк не вдається досягти іншими способами (зокрема, пористі самозмашувальні підшипники), отримати сплави з таких несплавлюваних металів, як W і Cu, виготовляти багатокомпонентні суміші тощо. Вона дозволяє підвищити коефіцієнт використання металів до 0,7—0,9, збільшити продуктивність праці та зменшити собівартість деталі порівняно із звичайною технологією, незважаючи на більшу вартість металевих порошоків (скорочення або повне вилучення механічної обробки, забезпечення кращих експлуатаційних показників). Через високу вартість прес-форм та іншого обладнання виготовляти деталі машин і приладів методом порошкової металургії доцільно лише за умови масового виробництва.

#### Виробництво порошкових сплавів

Технологічний процес виробництва порошкових сплавів передбачає отримання порошоків, підготовку шихти, пресування та спікання заготовок.

Отримання порошоків: механічне подрібнення залізної і сталеві стружки; відновлення з оксидів тугоплавких металів (W, Mo та ін.); розпилення рідкого металу (Al, Cu, Sn та ін.) стиснутим повітрям; електролітичне осадження (Cu, Sn, Fe та ін.).

Підготовка шихти: очищення порошку від забруднень, сушіння, додаткове подрібнення, відпал (для зняття наклепу, поліпшення однорідності металів у захисній або відновній атмосфері), класифікація за розміром з використанням сит, змішування.

Пресування: проводять у штампах — прес-формах при тиску 98—558 МПа (10—60 кг/мм<sup>2</sup>). Під час пресування відбувається механічне зчеплення часток порошоків.

Спікання заготовок: відновлення оксидів на металевих частках, міцний контакт, зняття внутрішніх напружень і спотворень кристалічної решітки, рекристалізація, дифузія. Унаслідок спікання маломіцні механічні зв'язки між частками порошку замінюються міцнішими міжатомними зв'язками.

Заготовки спікають у печах у захисній атмосфері. Температура спікання заготовок, запресованих з порошку одного металу становить приблизно 75 % температури плавлення даного металу. Наприклад, для Fe ця температура складає 1100—1200 °C, а для Cu — 800—900 °C, для Mo — 2100—2300 °C.

Спикання різних порошків відбувається за температури, що перевищує температуру найбільш легкоплавкого компонента. Триває процес спикання звичайно 1—3 год.

Іноді пресування і спикання об'єднують в одну операцію. У цьому разі занижують тиск (всього 5—10 % тиску звичайного пресування) і температуру (на 10—30 % нижчу від температури спикання холоднопресованих заготовок).

### Застосування порошкових сплавів

Відповідно до призначення порошкові сплави ділять на антифрикційні, фрикційні, пористі, щільні, тугоплавкі, електротехнічні та тверді. В антифрикційних сплавах пори займають до 20—30% об'єму (табл. 22). Часто в сплави вводять 1—3% С, який заповнює пори і є твердим мастилом. Міцність фрикційних сплавів не дуже висока тому тонкий шар сплаву з'єднується (здебільшого спиканням під тиском) зі сталеву основою (диском, стрічкою). У пористих сплавах об'єм пор сягає 80 % загального об'єму виробу.

Таблиця 22

Застосування і склад порошкових сплавів

| Сплав            | Призначення  | Вихідні матеріали (порошки)                                     |
|------------------|--|---|
| Антифрикційний   | Підшипники ковзання (містять до 30% пор від загального об'єму) | Залізо: залізо і графіт; бронза і графіт                        |
| Фрикційний       | Гальмові диски, муфти зчеплення                                | Залізо, мідь, азбест та ін.                                     |
| Пористий         | Фільтри (містять до 10% пор від загального об'єму)             | Бронза, латунь, нікель та ін.                                   |
| Щільний          | Деталі машин, вимірювальний інструмент                         | Сталь, бронза, латунь, алюміній та ін.                          |
| Тугоплавкий      | Дріт для ламп, контакти, деталі приладів                       | Вольфрам, молібден та ін.                                       |
| Електротехнічний | Контакти   | Мідь і графіт; бронза, графіт та ін.                            |
| Твердий          | Різальний інструмент, деталі бурів                             | Карбіди вольфраму і кобальт; карбіди молібдену і кобальт та ін. |



## Розділ II

### КОЛЬОРОВІ МЕТАЛИ І СПЛАВИ

#### Алюміній та його сплави

Алюміній — другий, широко поширений (після заліза) метал у сучасній техніці. Датський учений Х. Ерстед у 1825 році, діючи амальгамою калію на безводний хлористий алюміній  $AlCl_3$ , і потім відганяючи ртуть, дістав відносно чистий алюміній. Температура плавлення алюмінію  $660^\circ C$ , його кристалічна решітка — гранецентрований куб (ГЦК), густина  $2699 \text{ кг/м}^3$ . Al має високу електропровідність, яка складає 65 % від електропровідності Cu. Залежно від чистоти розрізняють алюміній особливої чистоти А999 (99,99 % Al), високої чистоти А995 (99,995 % Al) і технічної чистоти А8, А7, А5 і т. д. Чистий Al важко піддається обробці різанням.

Технічний Al виготовляють у вигляді листів, профілів, прутків, дроту та інших напівфабрикатів і маркують АД0, АД1. Алюміній має високу корозійну стійкість внаслідок утворення на його поверхні оксидної плівки  $Al_2O_3$ . Механічні властивості відпаленого алюмінію високої чистоти такі:  $\sigma_s = 50 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 50\%$ , а технічного алюмінію  $\sigma_s = 80 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 35\%$ . Технічний алюміній застосовують для виготовлення трубопроводів, палубних надбудов морських та річкових суден, кабелів, електропроводів, шин, корпусів годинників, фольги, посуду тощо. Ще ширше використовують сплави алюмінію.

Найбільше застосовують сплави Al—Cu, Al—Si, Al—Mg, Al—Cu—Mg, Al—Cu—Mg—Si, Al—Zn—Mg—Cu. Усі сплави алюмінію можна розділити на дві групи:

— деформівні, призначені для виготовлення напівфабрикатів (листів, прутків, профілів, труб і т. ін.), а також поковок і штамповок.

— ливарні, призначені для фасонного литва.

У свою чергу, деформівні сплави ділять на сплави, що не зміцнюються термічною обробкою, і сплави, які термічною обробкою зміцнюються. Деформівні алюмінієві сплави, що не зміцнюються термічною обробкою, характеризуються невисокою міцністю, але доброю пластичністю  $\delta = 40\%$ . До них відносяться сплави алюмінію з Mn та Mg (вміст останнього до 6 %). Поміж сплавів алюмінію з Mn і Mg широкого застосування набули сплав АМц, що містить 1,0—1,6 % Mn і сплави АМг2, АМг5, які містять відповідно 1,8—2,6 і 4,8—5,8 % Mg та 0,2—0,6 % і 0,3—0,8 % Mn. Ці сплави майже завжди однофазні і мають структуру твердого розчину (рис. 80). Вони добре зварюються, стійкі проти корозії і застосовуються для малонавантажених деталей, які виготовляють холодним штампуванням та глибокою витяжкою, а також для зварних конструкцій. Зміцнення сплавів можливе лише шляхом холодного деформування.

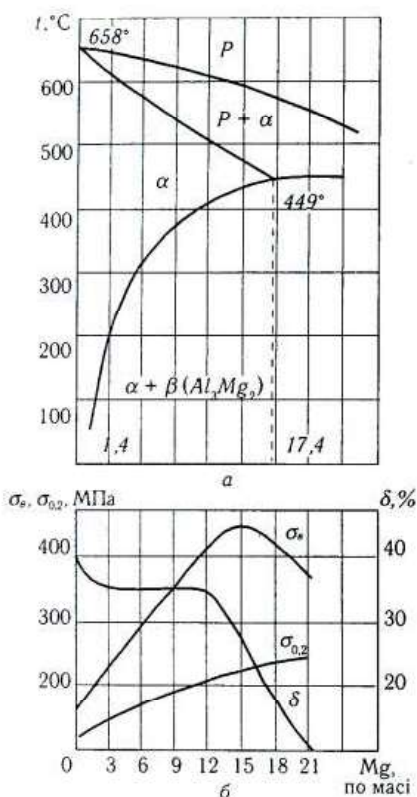


Рис. 80. Діаграма стану сплавів системи Al—Mg а і залежність механічних властивостей алюмінію від вмісту магнію б

Сплави на алюмінієво-магнієвій основі з невеликими добавками титану, берилію, наприклад сплав АМг6 добре оброблюється тиском.

Деформівні алюмінієві сплави, що зміцнюються термічною обробкою, це передусім дюралюміні, авіаль що містять 0,45—0,9 % Mg, 0,5—1,2 % Si, 0,2—0,6 % Cu, 0,15—0,35 % Mn, Fe ≤ 0,5 %, Zn ≤ 0,1 %. Такі сплави мають у своєму складі по три—чотири, а деколи і більше компонентів. Їх здатність зміцнюватись термообробкою можна пояснити на прикладі подвійної діаграми стану системи Al—Cu (див. рис. 81), бо майже в усіх сплавах даної групи звичайно присутня мідь. Cu утворює з Al твердий розчин з граничною розчинністю 5,6 % при температурі 548 °C. З пониженням температури розчинність міді в алюмінії швидко зменшується. Сплави, що містять кілька десятих часток відсотка міді, як правило, мають однофазну структуру твердого розчину міді в алюмінії.

Якщо двофазний сплав з 5,6 % Cu нагріти понад 548 °C, то частинки  $\text{CuAl}_2$  розчиняться в алюмінії і сплав набуде однофазної структури твердого розчину. Швидке охолодження такого сплаву (гартування) не дає можливості виділитися фазі  $\text{CuAl}_2$  з твердого розчину, внаслідок чого сплав зміцнюється.

Деформівні алюмінієві сплави піддаються гартуванню та старінню. Температура гартування сплавів Al—Cu (рис. 81) визначається лінією *abc*, яка проходить вище лінії межової розчинності для сплавів, що містять ≤ 5,6 % Cu, і нижче евтектичної лінії (548 °C) для сплавів, що містять понад 5,6 % Cu. При нагріванні під гартування сплавів з вмістом до 5,6 % Cu залишкова фаза  $\text{CuAl}_2$  повністю розчиняється і при подальшому швидкому охолодженні фіксується лише пересичений  $\alpha$ -твердий розчин, який містить стільки міді, скільки її взагалі є у сплаві. При вмісті понад 5,6 % Cu у структурі загартованих сплавів утворюється пересичений  $\alpha$ -твердий розчин, який відповідає точці *b*, і нерозчинні при нагріванні кристали інтерметалідів (тобто сполуки  $\text{CuAl}_2$ ). Тривалість витримки

при температурі гартування, необхідна для розчинення інтерметалідних фаз, залежить від структурного складу сплаву, типу печі і товщини виробу (загалом від 10 хв. до 3,5 год. для фасонних відливок 2—15 год).

Після гартування сплави піддають старінню — витримці при кімнатній температурі кілька діб (природне старіння) або 10—24 год. при підвищеній температурі (штучне старіння).

Дюралюміни — сплави на основі системи Al—Cu—Mg, куди з метою підвищення корозійної стійкості вводять Mn. Найбільш відомі сплави Д18, що містить 2,2—3,0 % Cu, 0,2—0,5 % Mg та Д16, що містить 3,8—4,6 % Cu, 1,2—1,5 % Mg, 0,3—0,5 % Mn.

Шкідливою домішкою для дюралюмінів є Fe, вміст якого не повинен перевищувати 0,5—0,6 %.

Дюралюміни добре деформуються і в гарячому, і в холодному стані; зміцнюють їх звичайно у воді та природним старінням.

Для захисту листового дюралюміну від корозії, яка навіть при додаванні Mn є значною, широко застосовують плакування чистим алюмінієм. Плакування здійснюють сумісним гарячим прокатуванням злитків дюралюміну, обкладеного листами (товщиною до 6 мм) чистого алюмінію марок А8, А85.

Сплави авіаль (АВ та ін.) поступаються дюралюмінам у міцності, проте вони пластичніші як в гарячому, так і в холодному стані. Використовують сплави для легких конструкцій, які зазнають гнуття та інших деформацій при монтажі. Ці сплави містять такі самі елементи, що і дюралюміни, проте у меншій кількості, і додатково леговані кремнієм.

Найміцнішими алюмінієвими сплавами є сплави типу В95, що містить 1,4—2,0 % Cu, 1,8—2,8 % Mg, 0,2—0,6 % Mn, 5—7 % Zn і 0,01—0,25 % Cr. Але вони менш корозійностійкі, ніж дюралюміни, й їхні характеристики міцності сильно понижуються при температурі 150 °С.

Відомо багато інших складних деформівних сплавів для кування, штампування та роботи в умовах підвищених температур АК4, АК6, АК8, АК4-1.

Ливарні алюмінієві сплави прийнято маркувати двома літерами АЛ (алюміній ливарний).

Ливарні сплави алюмінію з магнієм, міддю та іншими елементами, піддають термічній обробці, оскільки їх властивості при цьому змінюються в дуже широких межах. Ливарних сплавів досить багато, але найбільш відомі серед них силуміни Al—Si і сплави алюмінію з міддю Al—Cu. Типовим силуміном є сплав АЛ12, який містить 10—13 % Si. Він має високу рідкотекучість, малу усадку, стійкий проти корозії.

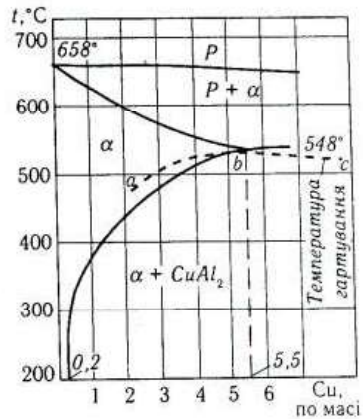


Рис. 81. Діаграма стану і температура гартування сплавів системи Al—Cu



**Спечені алюмінієві сплави.** Широко використовувані сплави на основі Al —  $Al_2O_3$  дістали назву САП (спечений алюмінієвий порошок). Ці сплави отримують шляхом холодного брикетування алюмінієвого порошку (пудри), вакуумного відпалу і подальшого спікання нагрітих брикетів під тиском. САП складається з дисперсних лусок оксиду  $Al_2O_3$ . Частинки  $Al_2O_3$  ефективно гальмують рух дислокацій і підвищують міцність сплаву. Вміст оксиду  $Al_2O_3$  в САП коливається від 6—9 % (САП-1) до 18—22 % (САП-4). Зі збільшенням вмісту  $Al_2O_3$  межа міцності підвищується від 30—32 кг/мм<sup>2</sup> (САП-1) до 44—46 кг/мм<sup>2</sup> (САП-4), а відносне видовження відповідно знижується від 5—6 до 1,5—2,0 %.

### Магній та його сплави

Магній — характерний елемент мантії Землі, який переважно міститься в основних породах (4,5 %). Відкритий у 1808 р. англійським ученим Г. Деві, який отримав амальгаму, а з неї після відгонки ртуті — новий порошкоподібний метал (магній). Температура плавлення магнію 651 °С, його кристалічна решітка гексагональна, густина 1739 кг/м<sup>3</sup>. Теплопровідність Mg значно вища, ніж в Al. На повітрі магній легко займається; використовують його в піротехніці та хімічній промисловості.

Магнієві сплави отримують сплавлюванням Mg з: до 10 % Al, до 5—6 % Zn, до 2,5 % Mn, до 1,5 % Zr. Усі ці елементи, як свідчать початкові області відповідних подвійних діаграм стану (рис. 82), мають обмежену розчинність у магнії. Алюміній утворює з магнієм сполуку  $Al_3Mg_4$ , а цинк —  $MgZn_2$  отже, при охолодженні магнієвого сплаву, який містить зазначені елементи, з твердого розчину мають виділитися зміцнювальні вторинні кристали надлишкових фаз, тобто такі сплави можна піддавати гартуванню та старінню.

Магнієві сплави, як і алюмінієві, розділяють на дві групи:

— ливарні, які призначені для отримання деталей методом фасонного лиття, їх маркують літерами МЛ і цифрою, що означає умовний номер сплаву, наприклад, МЛ15, МЛ16 і т. д.;

— деформівні, які можна піддавати пресуванню, прокатуванню, куванню, штампуванню та ін.; маркують їх літерами МА і цифрою, що означає умовний номер сплаву, наприклад, МА1, МА14 і т. д.

Магнієві сплави добре обробляються різанням і досить добре зварюються, особливо аргонодуговим методом.

Завдяки високій питомій міцності магнієві сплави знайшли застосування в авіабудуванні та інших галузях народного господарства. Використовують ці сплави також в атомних

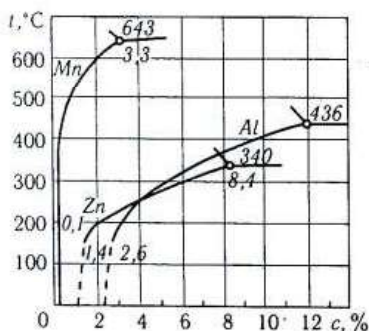


Рис. 82. Початкові області діаграм стану Mg з різними елементами с

реакторах. Через малу стійкість проти корозії вироби з магнієвих сплавів окислюють (оксидують). На окисдовану поверхню наносять лакофарбові покриття.

### Титан та його сплави

Титан є одним з найпоширеніших елементів земної кори (0,57 %), і займає з цього приводу четверте місце серед металів після Al (8,13 %), Fe (5 %), Mg (2,1 %). Він був відкритий у 1791 р. англійським аматором-мінерологом У. Грегором і довгий час не знаходив практичного застосування. Вважали, що це крихкий і маломіцний метал, який не може бути використаний у конструкціях. Практично титан почали застосовувати лише в 1948 р. Температура плавлення титану 1668 °С. Переваги титану порівняно з іншими металами такі: мала густина 4505 кг/м³, надзвичайно висока корозійна стійкість (більша, ніж нержавіючої сталі), значна жароміцність і велика питома міцність: відношення границі міцності до густини  $\sigma_s/\rho \cdot g$ , де  $\rho$  — густина в кг/м³,  $g$  — коефіцієнт переведу кг/м³ в н/м². За питомою міцністю титанові сплави перевищують конструкційні сталі й алюмінієві сплави (табл. 23).

Таблиця 23

Питома міцність матеріалів\*

| Матеріал                | Титановий сплав BT15 | Алюмінієвий сплав B96 | Сталь 03Н18К9М5Т |
|-------------------------|----------------------|-----------------------|------------------|
| $\sigma_s/\rho \cdot g$ | 30                   | 23                    | 27               |

\*Питома міцність, що отримується діленням міцності  $\sigma_s$  на густину  $\rho$ , одночасно представляє собою руйнуючу довжину в км. Дріт довжиною 27 км із сталі 03Н18К9М5Т руйнується під дією власної маси.

Завдяки своїм властивостям титан і його сплави є цінним конструкційним матеріалом в авіаційній промисловості, ракетобудуванні, хімічній промисловості.

Титан — поліморфний матеріал та існує у двох алотропічних видозмінах —  $\alpha$  і  $\beta$ . Температура поліморфного перетворення  $\alpha \rightleftharpoons \beta$  становить 882 °С.  $\alpha$ -титан нижче 882 °С має гексагональну решітку,  $\beta$ -титан понад 882 °С має решітку об'ємоцентрованого куба.

Технічний титан виготовляють у вигляді листів, прутків, дроту, труб і т.д. Він буває трьох марок, а саме: BT1-00, що містить 99,53 % Ti, BT1-0 — 99,48 % Ti, BT1-1 — 99,44 % Ti. Його механічні показники:  $\sigma_s = 294\text{—}490$  МПа,  $\delta = 20\text{—}30$  %.

Для отримання титанових сплавів з більш високими характеристиками, титан легують різними металами — Al, Cr, Fe, Mn, Mo, Sn, V (рис. 83). Легування змінює положення температури алотропічного перетворення титану ( $\alpha \rightarrow \beta$ ) (рис. 84). Елементи, що підвищують температуру ( $\alpha \rightarrow \beta$ ) — перетворення (рис. 84, а) і сприяють стабілізації  $\alpha$ -твердого розчину, називають  $\alpha$ -стабілізаторами (Al, O, N). Елементи, що понижують температуру ( $\alpha \rightarrow \beta$ ) — перетворення (рис. 84, б, в) та сприяють стабілізації  $\beta$ -твердого розчину, називають  $\beta$ -стабілізаторами (Mo, V, Cr, Fe, Mn).

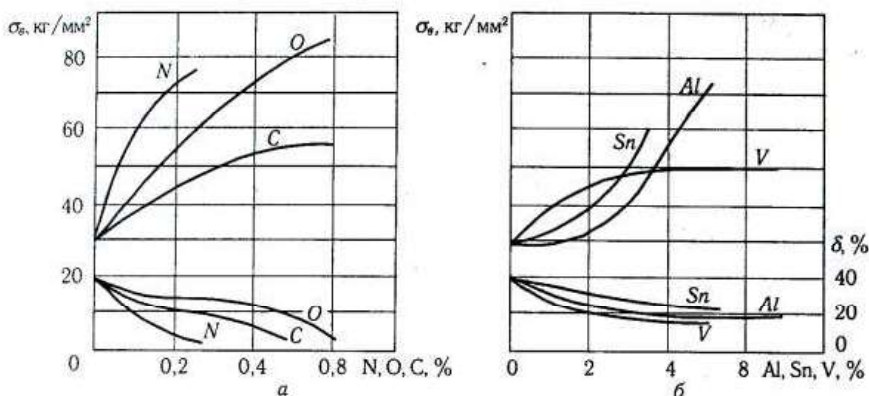


Рис. 83. Вплив легуючих елементів і домішок на механічні властивості Ti:  
 а — елементи, що утворюють тверді розчини проникнення;  
 б — елементи, що утворюють тверді розчини заміщення

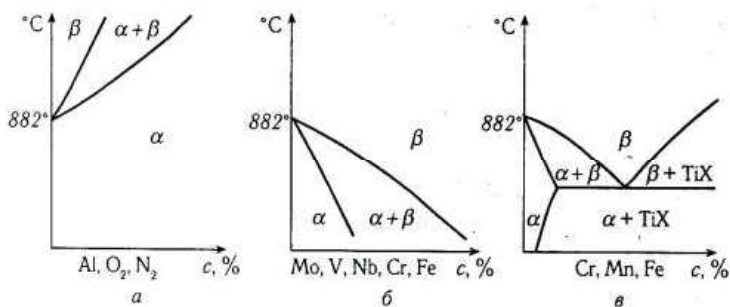


Рис. 84. Вплив легуючих елементів  $c$  на алотропічні перетворення Ti

У сплавах Ti з Cr, Mn, Fe відбувається евтектійний розпад  $\beta$ -фази (рис. 84, в) з утворенням хімічних сполук — інтерметалідів (титанідів).

Залежно від будови титанові сплави класифікують на три групи: сплави зі структурою  $\alpha$ -твердого розчину, сплави з мішаною структурою  $(\alpha + \beta)$ -твердого розчину і сплави зі структурою  $\beta$ -твердого розчину.

У промисловості найчастіше застосовують в основному сплави зі структурою  $\alpha$  і  $(\alpha + \beta)$ . Усі промислові сплави титану, як правило, містять алюміній. Система Ti—Al для сплавів титану має таке саме значення, як для сплавів заліза система Fe—Fe<sub>3</sub>C. Алюміній підвищує границю міцності, але зменшує пластичність сплавів.



Титан і  $\alpha$ -сплави титану не змінюються термічною обробкою і їх піддають лише рекристалізаційному відпалу. Температура відпалу має бути вищою за температуру рекристалізації, але не повинна перевищувати температуру перетворення  $\alpha + \beta \rightarrow \beta$ , оскільки в  $\beta$ -області відбувається сильний ріст зерна. Рекристалізаційний відпал проводять переважно при температурі 750—850 °С. ( $\alpha + \beta$ -сплави на відміну від  $\alpha$ -сплавів можуть бути зміцнені гартуванням з наступним старінням. Загартовують ці сплави здебільшого від температур, які відповідають ( $\alpha + \beta$ -області (рис. 85). При охолодженні із швидкістю вище критичної сплавів, що нагріті до області  $\beta$ -фази, протікає мартенситне перетворення в інтервалі температур  $M_n$ — $M_s$ . При цьому утворюється голчаста структура мартенситного типу, яку позначають  $\alpha'$ . Решітка  $\alpha'$ -фази, як і  $\alpha$ -фази, гексагональна і являє собою пересичений твердий розчин на основі  $\alpha$ -фази. У процесі подальшого старіння формується структура із суміші  $\alpha'$  і  $\alpha$ -фаз. При цьому міцність дещо знижується, але зростає пластичність.

У сплавах з  $\beta$ -ізоморфними стабілізаторами при гартуванні  $\beta$ -фаза змінюється титановим мартенситом  $\alpha'$  із ромбічною решіткою. Фаза  $\alpha'$  відноситься до самостійних мартенситних фаз. Збільшення кількості  $\alpha'$ -фази супроводжується зменшенням міцності і твердості сплавів та підвищенням їхньої пластичності. В більшості випадків гартування використовують як попередню стадію перед старінням.

$\alpha + \beta$  — сплави: ВТ6, ВТ8, ВТ14, що містять 5,5 % Al, 1 % V, 3 % Mo.

ВТ14 — гартування з 860—880 °С у воді і наступне старіння при 480—500 °С 12—16 год.

$\alpha$ -сплави: ВТ5, ВТ5-1 та ін.

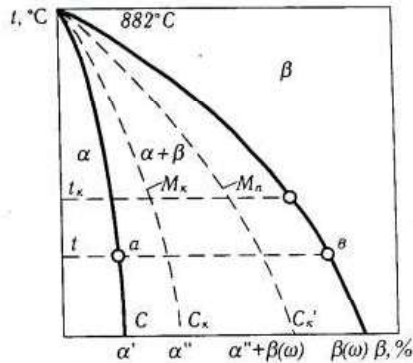


Рис. 85. Фазовий склад сплавів титану після гартування із  $\beta$ -області в залежності від кількості  $\beta$ -стабілізатора

### Тугоплавкі метали та їх сплави

До тугоплавких металів відносяться метали, температура плавлення яких вища, ніж у заліза 1539 °С, крім металів платинової та уранової груп і деяких рідкоземельних.

Більш широко у сучасній техніці застосовуються такі тугоплавкі метали, як Cr, V, Nb, Mo, Ta, W. Температура плавлення їх відповідно дорівнює 1875, 1900, 2468, 2625, 3000 та 3400 °С.

Незважаючи на те, що ці метали відомі науці вже понад 150 років, до другої світової війни у чистому вигляді застосовували лише три з них — молібден, тантал і вольфрам і то в дуже обмежених кількостях (в основному у спектротехніці).

Ситуація різко змінилась, коли для створення надзвукових літаків, космічних кораблів, ракет, атомних реакторів виникла потреба в матеріалах, надзвичайно міцних при температурах від 1100 до 2000 °С і вище. Поставлене завдання було з успіхом виконане. Серед конструкційних матеріалів важливе місце займають тугоплавкі метали та їхні сплави. Слід зазначити, що вищу жароміцність мають сплави на основі тугоплавких металів.

Усі тугоплавкі метали через відносно низьку жаростійкість при температурі 400—600 °С потребують захисту від корозії. Існують різні види захисних покриттів — металеві, інтерметалідні, керамічні тощо.

Ст, Мо і W, незважаючи на високу жароміцність, схильні до крихкого руйнування, яке зумовлене високою температурою порогу холодноламкості, яке особливо підвищують атоми проникнення — С, N, H і О. Після деформування цих металів нижче температури рекристалізації поріг холодноламкості знижується.

Хром найчастіше застосовують для виплавки хромистих сталей, а також для створення декоративних корозійностійких покриттів (хромування поверхонь).

З метою підвищення жароміцності хрому його легують Ta, Nb, V та іншими елементами. Сплави на основі хрому можуть тривалий час працювати при температурі до 1100 °С і дуже недовго — при температурі 1500—1600 °С.

Хром і його сплави за жаростійкістю мають незаперечливі переваги над усіма існуючими жаростійкими сплавами на залізній та нікелевій основі, а також сплавами на основі інших тугоплавких металів.

Молібден характеризується високою корозійною стійкістю, малим перерізом захоплення теплових нейтронів. Легування молібдену невеликою кількістю Zr, Ni, Hf істотно підвищує жароміцність. Сплави на основі молібдену можуть працювати при температурі до 1370 °С. Значна кількість молібдену йде на виробництво сталі.

Вольфрам — найбільш тугоплавкий елемент. Він є головним компонентом багатьох жароміцних сплавів на металевій основі. Його широко застосовують для легування сталей і отримання твердих сплавів на основі карбідів WC, у радіоелектроніці, електровакуумних приладах, рентгенотехніці та інших. Дуже перспективним є сплав W+15 % Мо. Як і сам вольфрам, він може працювати при температурі 2500 °С і вище.

Ванадій широко використовують при виробництві сучасної техніки.

Основним споживачем ванадію є чорна металургія, де цей метал використовують для легування сталей. Уведення в сталь 0,15—0,25% ванадію різко підвищує її міцність, в'язкість, опір втомі та зносостійкість. V у сталі є одночасно і розкислювачем, і карбідотвірним елементом. Карбіди ванадію, що розміщуються



у вигляді дисперсних часток, перешкоджають росту зерна при нагріванні сталі. Ванадій є важливим легуючим елементом у сплаві титану.

**Ніобій** відрізняється високою технологічністю, зварюваністю, корозійною стійкістю і малим перерізом захвату теплових нейтронів, порівняно невеликою густиною ( $8570 \text{ кг/м}^3$ ). Він мало чутливий до домішок проникнення і має значно нижчий поріг холодноламокості. Підвищити жароміцність ніобію можна легуванням Zr, Hf, W, Mo і V. Сплави на основі ніобію здатні працювати в температурному інтервалі  $1100\text{—}1300^\circ\text{C}$ . Ніобій широко застосовують як легуючий елемент у сталі.

**Тантал** має цілий комплекс цінних властивостей — високу жароміцність, пластичність, зварюваність, корозійну стійкість. Крім нових областей техніки, його використовують у виробництві нержавіючих сталей, у кістковій та пластичній хірургії для скріплення кісток, латок на черепі тощо. Проте елементи, що утворюють тверді розчини проникнення роблять метал крихким.

Тугоплавкі метали є надпровідні при температурах, які близькі до абсолютного нуля.

### Мідь та її сплави

Мідь відноситься до числа металів, відомих ще з глибокої давнини. Ранньому знайомству людини з міддю сприяло те, що вона зустрічається в природі у вільному стані у вигляді самородків.

Мідь — пластичний метал. Густина міді  $8960 \text{ кг/м}^3$ , температура плавлення  $1083^\circ\text{C}$ , кристалічна решітка — гранецентровий куб (ГЦК).

Мідь є важливим провідниковим матеріалом, за електропровідністю лише незначно поступається сріблу. Тому приблизно половину всієї міді споживає електрорадіотехнічна промисловість для виготовлення різних провідників. Широке застосування вона знаходить в електровакуумній техніці. Мідь добре протидіє корозії, легко обробляється тиском, але погано обробляється різанням.

Електропровідність міді суттєво знижується при наявності навіть дуже невеликої кількості домішок. Тому як провідниковий матеріал використовують електролітичну мідь марок М1 (99,0 % Cu), М0 (99,95 % Cu) і особливо чисту мідь М00 (99,99 % Cu). Залежно від механічних властивостей розрізняють мідь тверду, нагартвану (мідь МГ) і мідь м'яку, відпалену (мідь ММ).

Міцність і технічні властивості міді сильно знижуються при наявності Ві, Pb, S та O, які є шкідливими домішками. Дія Ві та Pb аналогічна дії S у сталі: вони утворюють з Cu легкоплавкі евтектики, розташовані по межах зерен, що спричиняє руйнування міді під час обробки тиском у гарячому стані. Тому допустимим вважають вміст не більше 0,002 % Ві та 0,005 % Pb. S та O знижують пластичність міді.

Через недостатню міцність міді  $\sigma_s = 160 \text{ МПа}$  у відпаленому стані чисту мідь як конструкційний матеріал використовують рідко. Широке застосування в промисловості мають сплави з іншими елементами — латуні та бронзи.



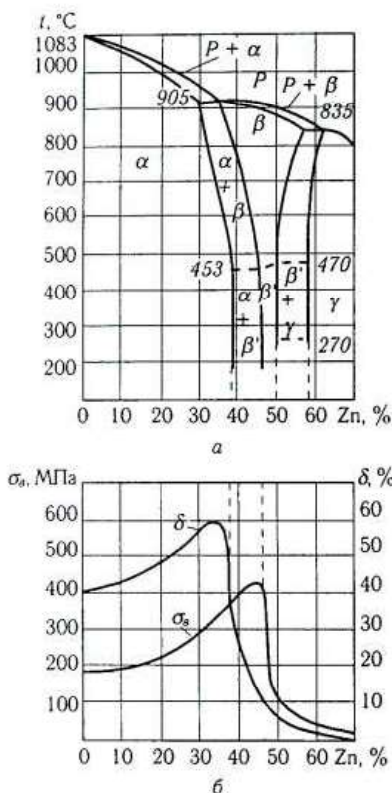


Рис. 86. Діаграма стану системи Cu—Zn (а) і залежність механічних властивостей литої латуні від вмісту Zn (б)

Для підвищення механічних показників і хімічної стійкості латуней до них часто вводять легуючі елементи: алюміній, нікель, марганець, кремній та ін.

Латуні маркують буквою «Л» і цифрою, що відповідає середньому вмісту міді. Наприклад, Л80 — латунь, що містить 80 % Cu і 20 % Zn. У марках латуні складнішого складу за буквою «Л» іде скорочена назва легуючих елементів: «О» — олово, «С» — свинець, «З» — залізо, «Мц» — марганець, «К» — кремній, «А» — алюміній і т. д., а після цього цифри, що вказують на вміст Cu та інших компонентів. Так, у латуні ЛМцС58-2-2 міститься 58 % Cu, 2 % Mn і 2 % Pb (решта Zn). Крім названих латуней широко застосовуються ще й такі латуні, як Л170, Л190, Л96 тощо.

Негативною властивістю латуней, що містять понад 20 % Zn, а особливо, якщо — понад 30 % Zn, є їх схильність розтріскуватися при витримці у вологій атмосфері.

**Латуні** — сплави, в яких основним легуючим елементом є цинк. У системі Cu—Zn (рис. 86) утворюється шість твердих розчинів:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  та ін. Практичне значення мають сплави, що містять приблизно до 46 % Zn, тобто  $\alpha$ -латуні і  $\alpha + \beta$ -латуні. Вартість латунних сплавів порівняно з міддю менша, оскільки цинк значно дешевший за мідь. Латуні застосовують у приладобудуванні, машинобудівній промисловості і найширше в хімічному машинобудуванні. Механічна міцність латуні вища, ніж міді; вона добре обробляється різанням.

При вмісті до 36 % Zn утворюється  $\alpha$ -фаза ( $\alpha$ -латуні), яка є твердим розчином заміщення міді цинком, а при концентрації 39 — 46 % Zn двофазні ( $\alpha + \beta'$ )-латуні. Однофазні латуні характеризуються високою пластичністю. Вони добре деформуються і в холодному, і в гарячому станах. Двофазні латуні більш міцні і менш пластичні, ніж однофазні завдяки  $\beta'$ -фазі, яка є твердішою та крихкішою. Ці латуні звичайно піддають гарячій обробці тиском. Усі латуні за технологічною ознакою ділять на деформівні, з яких роблять листи, стрічки, труби, дрід, і ливарні — для фасонного лиття.

**Бронзи.** Бронзами називають сплави міді з оловом (олов'яністі бронзи, рис. 87), алюмінієм, кремнієм, берилієм, свинцем (безолов'яністі бронзи). З бронзи ще в давнину робили зброю, знаряддя праці, предмети побуту, оскільки бронза міцніша і корозійностійкіша, ніж мідь. Завдяки відмінним ливарним властивостям з цих сплавів значно пізніше вже стали відливати гармати, дзвони та пам'ятники. Сучасні олов'яністі бронзи твердіші за мідь, але добре заповнюють форму при литті й обробляються різанням, а також відрізняються високою корозійною стійкістю. Нині бронзи використовують при виготовленні арматури газових і водопровідних ліній, у хімічному машинобудуванні та багатьох інших галузях промисловості. Малий коефіцієнт тертя і стійкість до зношування робить їх незамінним матеріалом для вкладишів підшипників, черв'ячних коліс, шестерень та інших деталей відповідальних і точних приладів.

Бронзи маркують буквами «Бр», після яких, як і в латуней, вказують інші компоненти (крім міді), а в кінці — цифрами відсотковий вміст компонентів. Легуючі елементи шифрують так: «О» — олово, «А» — алюміній, «Ф» — фосфор, «Т» — титан, «Ц» — цинк і т. д. Наприклад, марка БрОЦ4-3 означає, що в бронзі є в середньому 4 % Sn, 3 % Zn, а решта — Cu.

**Олово** — дорогий і дефіцитний метал, тому широке застосування знайшли заміники олов'яних бронз — так звані безолов'яністі бронзи. До них слід віднести в першу чергу алюмінієві бронзи наприклад, БрА5 і складніші, що обробляються тиском наприклад, БрАЖМн10-3-1,5. Це стійкі проти корозії, жароміцні та зносостійкі сплави. Використовують їх для виготовлення хімічної апаратури, бронзу БрА5 — для карбування монет.

Винятково добрими механічними властивостями відзначаються крем'яністі наприклад, БрКА4-1-3 і марганцевисті наприклад, БрМн5 бронзи. Дуже міцною і пружною є берилієва бронза БрБ2. З цих бронз виготовляють пружини, пружинні контакти і багато іншого.

Останнім часом набув широкого вжитку мельхіор — сплав 80 % Cu з 20 % Ni. З мельхіору роблять прикраси, столові та чайні прибори. Для

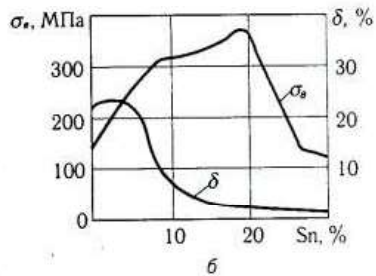
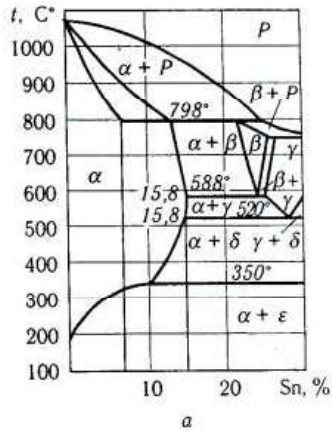
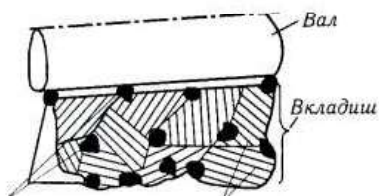


Рис. 87. Частина діаграми стану системи Cu-Sn (а) і залежність механічних властивостей бронзи від вмісту Sn (б)

виготовлення монет, а також хірургічних інструментів, деталей машин і приладів застосовують так званий монель-метал, який містить 68 % Ni, 28 % Cu і невеликі домішки Mn та Fe).

### Підшипникові сплави

Це антифрикційні сплави, призначені для подовження терміну служби поверхонь тертя. (наприклад, у підшипниках між вкладишем і валом). Для вкладок підшипника має бути підібраний такий матеріал, який охороняв би від зносу вал,



Опорні тверді Пластична  
включення в'язка основа

Рис. 88. Схема роботи вала з вкладишем

сам мінімально зношувався, та полегшував роботу третього вузла, тобто зменшував коефіцієнт тертя. Підшипниковий матеріал повинен являти собою відносно пластичну і в'язку основу з включеннями твердих опорних часток. В умовах тертя зношуватиметься пластична основа, а вал контактуватиме переважно з твердими опорними включеннями. Отже, тертя зазнає не поверхня підшипника, мастило утримуватиметься в тих місцях пластичної основи, які зношуються (рис. 88).

**Бабіти** — сплави на основі Sn або Pb, застосовують як підшипниковий сплав. Призначені для заливки підшипників ковзання, мають низьку температуру плавлення 350—450 °С, добру припрацьовуваність і не зхоплюються зі сталлю. Сплави повинні мати гетерогенну структуру, що складається з м'яких і твердих часток.

Кращі антифрикційні властивості олов'янистих бабітів Б83 і Б89, де буква «Б» означає бабіт, а цифра — вміст Sn у %, решта Sb і Cu. Ці бабіти містять велику кількість олова, яке дороге коштує, тому їх застосовують в основному для заливки підшипників великої потужності, коли потрібні висока в'язкість і найменший коефіцієнт тертя. Для інших цілей використовують бабіти, в яких значна частина Sn замінена Pb. Свинцевоолов'яністі бабіти (Б16, Б6, БН) мають дещо вищий коефіцієнт тертя, менш зносостійкі та більш крихкі. Бабіти БН і Б6 містять As і відрізняються дрібнозернистою структурою і доброю рідкотекучістю. Бабіт БН, крім того, містить Ni.

В свинцевих бабітах основними легуючими елементами є Ca і Na. Антифрикційну структуру в сплавах створює Ca, який утворює із Pb сполуку  $Pb_3Ca$ , що рівномірно розміщена в основі сплаву. Невелику кількість олова вводять в свинцеві сплави для зменшення здатності до окислення розплаву і покращення його адгезії з основою підшипника. Бабіти марки БКА використовують для заливки вкладишів підшипників рухомого складу залізниць.



Границя міцності бабітів низька — 8—10 кг/мм<sup>2</sup>, проте вона зростає під час природного старіння. Процес можна прискорити нагріванням до 50—70 °С. З підвищенням температури твердість бабітів сильно знижується. Тому робоча температура не повинна перевищувати 80 °С.

Сплави на основі цинку містять 8—12 % Al, 1—5,5 % Cu, 0,03—0,06 % Mg. Решта — цинк ЦАМ10-5, ЦАМ9-1,5. За властивостями вони рівноцінні свинцевим бабітам і їх також застосовують у підшипниках металорізальних верстатів, пресів тощо.

Бронзи відносяться до кращих антифрикційних матеріалів. Особливе місце серед них займають олів'янисті БрО10Ф1, БрО10Ц2 і олов'янисто-цинково-свинцевисті БрО5Ц5С5, БрО6Ц6С3 бронзи (ГОСТ 613-79). Їх застосовують для монолітних підшипників ковзання турбін, електродвигунів, компресорів, що працюють при значних тисках і швидкостях ковзання 10—12 м/сек.

Бронзи також широко використовують як компоненти порошкових антифрикційних матеріалів або тонких пористих покриттів, які містять тверді змащувачі матеріали.

Латуні використовують як замітники бронз для опор тертя. Але за антифрикційними властивостями вони поступаються бронзам. Двохфазні латуні ЛЦ16К4, ЛЦ38Мц2С2, ЛЦ40Мц3А та ін. (ГОСТ 17711-80) застосовують при швидкостях ковзання менше 2 м/сек і невисоких навантаженнях для опор тертя приладів.

### Благородні метали

До таких металів відносяться: Au, Ag, метали платинової групи, а також їх сплави. Свою назву вони отримали завдяки високій корозійній стійкості — практично вони цілком не схильні до корозії в звичайній атмосфері, воді і багатьох інших середовищах. Всі ці метали (крім Au і Ag) мають високу температуру плавлення, високу густину, не мають алотропічних перетворень (крім Rh), дуже пластичні (крім Rh і Os). Вони відрізняються високою вартістю.

Деякі властивості цих металів приведені в табл. 24.

Таблиця 24

Властивості благородних металів

| Метал        | Кристалічна решітка | Густина при 20 °С, кг/м <sup>3</sup> | $T_m$ , °С | Твердість, НВ | Окислюється на повітрі при температурі, °С |
|--------------|---------------------|--------------------------------------|------------|---------------|--|
| Рутеній (Ru) | Г 12                | 12200                                | 2250       | 200           | 100  |
| Родій (Rh)   | К 12                | 12412                                | 1960       | 55            | 600  |
| Паладій (Pd) | К 12                | 11970                                | 1552       | 30            | 600—800                                    |
| Срібло (Ag)  | К 12                | 10500                                | 960,5      | 20            | Не окислюється                             |
| Осмій (Os)   | Г 12                | 22500                                | 3050       | 350           | 18—20                                      |
| Іридій (Ir)  | К 12                | 22400                                | 2410       | 160           | 600—700                                    |
| Платина (Pt) | К 12                | 21450                                | 1769       | 30            | Не окислюється                             |
| Золото (Au)  | К 12                | 19320                                | 1064       | 18            | Не окислюється                             |

Благородні метали, в першу чергу Au і Ag, застосовують в ювелірній і зуболікувальній справі. Чисте золото за рахунок м'якості не застосовують. Легування золота сріблом мало доцільно, так як твердість підвищується незначно. Твердість сплавів Au-Ag не вище *НВ* 30. Легування золота міддю підвищує твердість при 10 % Cu твердість сплаву стає вища *НВ* 100. Корозійна стійкість при легуванні міддю знижується. Практично в ювелірній і зубопротезній справі застосовують потрібні сплави Au—Ag—Cu. Найбільш розповсюджені є сплави 375, 583, 750 і 916 проб — це означає, що в цих сплавах на 1000 г сплаву припадає 375, 583, 750 і 916 г Au, а решта — Cu і Ag. В металі кожні з проб, які указані співвідношення срібла і міді може бути різним.

Сплави 916 проби найбільш м'які, але й найбільш корозійностійкі. Зі зменшенням індекса проби корозійна стійкість зменшується. Найбільшу твердість і, відповідно, найбільшу зносостійкість мають сплави 583-ої проби при співвідношенні Cu:Ag біля 1:1. Сплави проб, які зазначені, мають колір золота.

Структури сплавів уявляють собою однорідні тверді розчини (сплави високих проб) або механічні суміші двох-трьох твердих розчинів.

Відпал цих сплавів наприклад, для рекристалізації може привести до окрихчення, внаслідок процесів упорядкування (утворення упорядкованих твердих розчинів типу AuCu і AuCu<sub>3</sub>).

Якщо в ювелірній і зубопротезній справі застосовують сплави Au і Ag, а метали платинової групи застосовування не мають, то в промисловості, навпаки, частіше застосовують сплави металів платинової групи.

Сплав 90 % Pt і 10 % Rh застосовують як сплав для термопар один електрод із цього сплаву, другий — із чистої платини із-за великої електрорушійної сили і високої окислостійкості. Така термопара може працювати до 1700 °С.

Для прецизійних вимірювальних і автоматично-керованих приладів застосовують потенціометри з обмоткою із благородних сплавів наприклад, дріт із сплаву Pt + 25 % Ir або сплаву Pt + 30—40 % Ag і т. д.

Для електричних контактів різних відповідальних апаратів застосовують сплави благородних металів із-за їх великої стійкості випаровуванню і окисленню це сплави Pt + Ir; Pt + W; Pt + Ag і т. д.

Високою твердістю і зносостійкістю у сполученні з дуже високою корозійною стійкістю володіє сплав Os + Ir. З нього виготовляють опорні точки різних вимірювальних інструментів та опори голок компасів, наконечники пер автоматичних ручок, частини, що обертаються вимірювальних і регулюючих приладів особливої точності ракетних систем.

### Частина III

## ВИБІР МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

### Розділ 16

#### ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ І ОСНОВИ ЇХ РАЦІОНАЛЬНОГО ВИБОРУ

Вибір металічних матеріалів для конкретних умов експлуатації є одним із основних завдань інженерної практики. Наслідком неправильного вибору матеріалів є погана якість конструкцій, машин і обладнання. Нерідко умови експлуатації є дуже специфічними: низькі або високі температури, агресивні хімічні середовища, знакозмінні циклічні навантаження, особливі умови тертя та ін. Часто матеріали працюють в умовах одночасної дії перерахованих вище факторів. Тому при виборі матеріалів в першу чергу вимагається всесторонній розгляд умов його роботи, ранжування факторів, що діють на матеріал за ступенем його впливу на надійність машини або механізму. Визначальні фактори повинні бути враховані обов'язково, менш визначальні — по можливості. Так, при виборі сталей і сплавів для газових турбін і сопел ракет, що працюють в умовах дії активних газових середовищ, необхідно розглядати вплив на властивості матеріалів високих температур, корозійного розтріскування, пітингової корозії, корозії під напруженням, водневого окрихчування, ерозії і загальної корозії. Але враховувати необхідно тільки перші шість факторів, а загальну корозію, як менш важливий фактор, слід враховувати по можливості. Наступним етапом вибору матеріалів повинно бути визначення комплексу необхідних властивостей, що забезпечують надійну і довговічну роботу конструкцій, машин і обладнання в заданих умовах експлуатації. Так як конструкційні матеріали характеризуються механічними, фізико-хімічними і технологічними властивостями, то розглядати необхідно всю гамму властивостей, особливо якщо в конструкції повинні працювати різні матеріали.

На жаль, часто комплекс необхідних властивостей матеріалу, оформлений у вигляді технічних вимог, складається не на основі точного аналізу і моделювання умов роботи, а на досвіді попередньої експлуатації аналогічного виробу або схожої конструкції. Але більш правильним є формування технічних вимог до матеріалів на основі моделювання умов роботи виробу, близьких до реальних, з використанням спеціальних стендів, на яких за допомогою тензодатчиків можна визначити рівень локальних пікових напружень у виробі.

У цьому випадку, коли немає можливості використати стенд для визначення робочого напруження, що виникає у виробі при експлуатації, необхідно використовувати розрахункові методи.



### **Фізико-хімічні властивості**

Фізичні властивості визначають поведінку матеріалів в теплових, гравітаційних, електромагнітних і радіаційних полях. Із важливих фізичних властивостей можна виділити теплопровідність, густину, коефіцієнт лінійного розширення. Низька теплопровідність зменшує теплопритоки і надає матеріалу теплоізолювальні властивості, а висока теплопровідність сприяє зниженню температурних градієнтів у виробках. Для літальних апаратів велике значення має зменшення маси конструкцій, тому для них доцільно використовувати матеріали з великою питомою міцністю, яка визначається співвідношенням міцності матеріалу до його густини. У цьому відношенні більш перспективними матеріалами є алюмінієві, магнієві і титанові сплави, а також композиційні матеріали. Застосування в з'єднаннях деталей із різних матеріалів обумовлює необхідність врахування їх коефіцієнтів лінійного розширення. Під хімічними властивостями розуміють здатність матеріалів вступати в хімічну взаємодію з іншими речовинами, чинити опір окисленню, проникненню газів і хімічно-активних речовин. Деталі для-будь якого виробу повинні бути сумісними із робочим середовищем. Корозія, корозійна втома, корозія під напруженням, водневе окрихчування можуть викликати пошкодження в металі і привести конструкцію до крихкого руйнування. Для криогенних конструкцій важливе значення має вплив хімічної взаємодії низькокиплячих продуктів (рідкий кисень, водень та ін.) із сплавами, з яких виготовляють ці конструкції. Такі хімічноактивні метали, як титан та його сплави, магнієві сплави, алюмінієві сплави при ударному навантаженні, можуть самозайматись при контакті з рідким киснем.

### **Механічні властивості**

Основою вибору матеріалів для створення надійної і працездатної техніки є їх механічні властивості, в першу чергу, міцність, яка характеризує здатність матеріалів чинити опір деформації і руйнуванню під дією різних навантажень, в різних середовищах і при різних температурах.

Розрахунок конструкцій на міцність проводять по допустимих напруженнях  $[\sigma]$ , які визначають із умов міцності при статичному навантаженні або довговічності при циклічному навантаженні. При статичному навантаженні допустиме напруження дорівнює відношенню граничного для даного матеріалу напруження до коефіцієнтів безпеки, тобто до коефіцієнта запасу міцності  $n_T$  для пластичних матеріалів і  $n_g$  для крихких. Для пластичних матеріалів за граничне напруження приймають границю текучості  $\sigma_{0,2}$ , для квазікрихких — границю міцності  $\sigma_g$ :

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{0,2}}{n_T} \text{ або } [\sigma] = \frac{\sigma_g}{n_g}.$$

Значення коефіцієнту запасу міцності залежить від багатьох факторів: розбіжності характеристик міцності, присутності в матеріалі дефектів, що допускаються технічними умовами, ступеню схематизації розрахункової процедури.

Значення коефіцієнту запасу міцності вибирається у відповідності із ГОСТ 14249.

За допустиме напруження приймають мінімальне, що знайдене в ГОСТ 14249, по границі текучості або границі міцності. Така методика використовується в багатьох країнах.

Коефіцієнти запасу можуть змінюватись в широких межах в залежності від умов роботи обладнання і досвіду роботи з конкретними матеріалами.

За даними практики, значення коефіцієнта запасу для серійних матеріалів звичайної техніки складає:  $n_T = 1,5$  і  $n_\sigma = 2,4$ .

Для ємностей і апаратів, що працюють під тиском, коефіцієнт запасу по границі текучості знаходиться в межах від 1,5 до 1,65, а по границі міцності — від 2,35 до 4.

Але розрахунки на міцність конструкцій за номінальними напруженнями з урахуванням коефіцієнтів запасу, не завжди гарантують необхідний ресурс їх роботи. Це пов'язано із тим, що запаси міцності не враховують ряду факторів, що сприяють виникненню пошкоджень і руйнувань несучих елементів конструкцій і машин. До таких факторів відносяться: присутність в металі дефектів типу тріщин, як вихідних, так і тих, що виникають при експлуатації, наявність мікро- і макронеоднорідностей за товщиною, в зонах зварних швів; поява локальних напружень внаслідок їх концентрації, а також залишкових технологічних напружень; нестабільність експлуатаційного навантаження за рахунок експлуатаційних і імпульсивних перевантажень, виникнення циклічних навантажень. Для врахування цих факторів необхідний перехід від розрахунку за номінальними напруженнями до аналізу локальних напружень, що виникають в окремих зонах виробу.

Для високоміцних матеріалів і матеріалів середньої міцності розрахунок допустимих значень напружень слід проводити на основі принципів механіки руйнування із врахуванням максимальних розмірів дефектів. У зв'язку із тим, що підвищення міцності супроводжується зменшенням пластичності і в'язкості матеріалу при розрахунках значень напружень для високоміцних матеріалів і матеріалів середньої міцності необхідно враховувати температурно-швидкісні умови експлуатації виробів.

Пластичність характеризує здатність матеріалу до пластичної деформації при перевищенні границі текучості, а в'язкість — здатність поглинати енергію зовнішніх сил при руйнуванні.

У різних матеріалів співвідношення пластичності і в'язкості може дуже відрізнятися. Наприклад, алюміній має малу в'язкість при високому відносному видовженні. Навпаки, термооброблена (покращена) легована сталь при порівняно невеликому видовженні має високу в'язкість.

Пластичність і в'язкість в розрахунки конструкторів не входить і є якісними показниками.

Пластичність характеризує здатність металу до перерозподілу напружень в зонах їх концентрацій. Пластична деформація зменшує локальні перенавантаження металу біля концентраторів напружень. В машинобудуванні



приймають пластичність конструкційної сталі задовільною, коли її відносне видовження, яке визначене на зразках діаметром 5 мм  $\delta_5 \geq 15\%$ .

Визначенням критерієм працездатності металічних сплавів і зварних з'єднань, що використовується ширше при низьких температурах, є ударна в'язкість, яка визначається на зразках із надрізом. При цьому певну складність представляє вибір необхідного рівня ударної в'язкості і виду зразків для її оцінки. В різних країнах прийнятий різний гарантований рівень ударної в'язкості. Сталь допускають до експлуатації, якщо її ударна в'язкість визначена на зразках типу Шарпи, розміром  $10 \times 10 \times 55$  мм з надрізом радіусом 0,25 мм  $KCV \geq 30$  Дж/см<sup>2</sup> (зразок типу 11 по ГОСТ 9454).

### Тріщиностійкість

Якими б точними не були розрахунки, по них не можна говорити про надійність роботи деталей. Необхідні випробування самих деталей, як на спеціальних стендах, так і безпосередньо в експлуатації. Маючи інформацію про стійкість деталей, можна встановити комплекс параметрів, які знаходяться в найбільшій кореляції із експлуатаційними властивостями деталей машин. При встановленні цих параметрів крім стандартних механічних властивостей  $\sigma_s$ ,  $\delta$ ,  $\psi$  повинні враховуватись також робота поширення тріщини КСТ, тріщиностійкість  $K_{Ic}$ , границя витривалості без концентратора напружень  $\sigma_{-1}$ , і з концентратором напружень  $\sigma_{-1k}$ , опір контактний втомі, опір зношуванню.

Аналіз статистичних даних показує, що деформація і в'язке руйнування деталей є причиною 15—20% всіх відмов механізмів і машин. Крихке руйнування відбувається частіше. Сприяють крихкому руйнуванню деталей низькі температури експлуатації, наявність тріщиноподібних дефектів, підвищених залишкових напружень, виникнення статичних і динамічних надлишкових навантажень, збільшення початкових навантажень, а також збільшення початкових дефектів під дією циклічних експлуатаційних навантажень і корозії. Крихке руйнування мостів, кранів, будівельних і дорожніх машин починається в зонах концентрації напружень і відбувається після деякого напрацювання. Це вказує на накопичення експлуатаційних пошкоджень, що знижують опір крихкому руйнуванню.

Підвищення опору деталей машин крихкому руйнуванню не може бути досягнуто підвищенням запасів статичної міцності, тобто зниженням їх номінальних напружень і збільшенням перерізу. Це досягається використанням більш стійких до переходу в крихкий стан матеріалів, відповідних конструктивних форм і технологій виготовлення виробів, підвищенням вимог до контролю на стадії виготовлення машин або конструкцій.

Надійність роботи конструкції залежить від опору матеріалу розповсюдженню тріщин, тобто від в'язкості руйнування  $K_{Ic}$ . Для оцінки конструкційної міцності сплавів в координатах  $K_{Ic} - \sigma_{0.2}$  будують відповідні діаграми (рис. 127). Підвищити опір крихкому руйнуванню при збереженні високої статичної міцності можна подрібненням зерна, термомеханічною обробкою, очищенням сталі від шкідливих



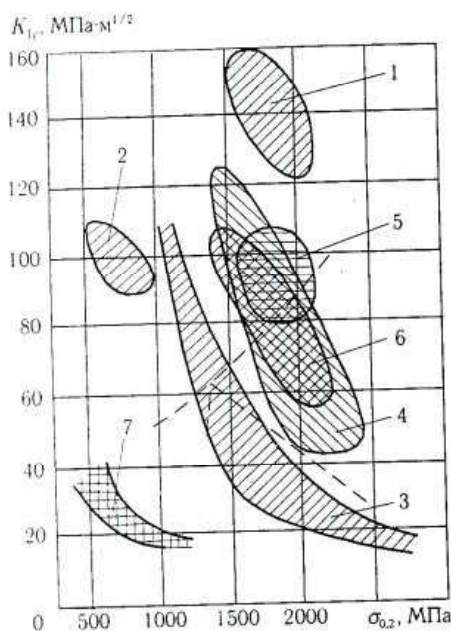


Рис. 127. Узагальнена діаграма конструкційної міцності сталей О. М. Романів, О. Н. Ткач

- 1 — метастабільні аустенітні сталі;
- 2 — низьковуглецеві сталі;
- 3 — середньо- і високовуглецеві сталі;
- 4 — мартенситно-старіючі сталі;
- 5 — сталі з дрібним зерном (номер 12—15);
- 6 — сталі після ТМО;
- 7 — евтектоїдні сталі з пластинчастим перлітом.

домішок, а також використанням метастабільних аустенітних сталей.

Значення  $K_{Ic}$  визначають експериментально на зразках з надрізом і з створеною на дні надрізу втомною тріщиною. Для розрахунку  $K_{Ic}$  при навантаженні зразка фіксують зусилля в момент підростання тріщини на деяку величину і переходу її до нестійкого поширення.

Величина  $K_{Ic}$  залежить від ступеня пластичної деформації біля вершини тріщини і характеризує опір розвитку в'язкої тріщини. Тому  $K_{Ic}$  називають в'язкістю руйнування. Чим більший  $K_{Ic}$ , тим вищий опір матеріалу руйнуванню — надійність. Коефіцієнт інтенсивності напружень в вершині тріщини в момент руйнування  $K_{Ic}$ , доповнює параметри  $\sigma_{0.2}$  і модуль Юнга  $E$  при розрахунках на міцність деталей, виготовлених із високоміцних сплавів (сталей з  $\sigma_s \geq 1200$  МПа; на основі Ті з  $\sigma_s \geq 800$  МПа і на основі АІ з  $\sigma_s \geq 450$  МПа). Він дозволяє визначити безпечний розмір тріщини при відомому робочому напруженні або безпечне напруження при відомому розмірі дефекту. Наприклад, при робочому напруженні  $\sigma_p$  (рис. 128) тріщина довжиною  $l$  буде безпечною для матеріалу II (крива II) і викличе руйнування в матеріалі I (крива I), що має менше значення  $K_{Ic}$  ( $K_{Ic}^I \leq K_{Ic}^{II}$ ).

Матеріал з більш високим значенням  $K_{Ic}$  має вищу надійність, так як руйнування відбувається при більшому напруженні або довжині тріщини.

### Холодноламкість

Для багатьох сплавів визначення в'язкості руйнування  $K_{Ic}$  викликає певні труднощі. В зв'язку із цим для сталей, що мають міцність  $\sigma_s \leq 1000$  МПа про опір крихкому руйнуванню судять не по в'язкості руйнування  $K_{Ic}$ , а по температурному порозу холодноламкості  $t_{50}$ .

Поріг холодноломкості характеризує вплив зниження температури на схильність матеріалу до крихкого руйнування. Його визначають за результатами ударних випробувань зразків з надрізом при температурі, яка знижується. Наявність при таких випробуваннях ударного навантаження, надрізу і низьких температур тобто основних факторів, які сприяють окрихчуванню, є важливим для оцінки поведінки матеріалу при екстремальних умовах експлуатації.

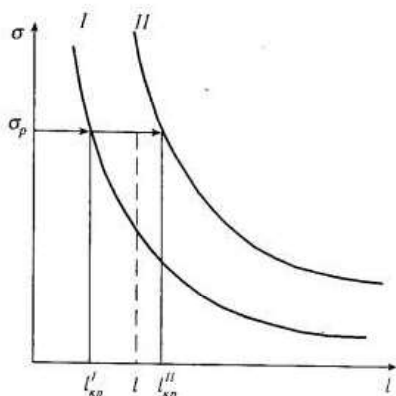


Рис. 128. Залежність критичного напруження  $\sigma$  від розміру дефекту  $l$  для двох матеріалів I і II з різними значеннями  $K_{Ic}$  ( $K_{Ic}^I \leq K_{Ic}^{II}$ )

На перехід від в'язкого руйнування до крихкого вказує зміна будови злому і різке зниження ударної в'язкості (рис. 129), яке спостерігається в інтервалі температур  $t_a - t_{кр}$  (граничні значення температур в'язкого і крихкого руйнування).

Будова злому змінюється від волокнистого матового при в'язкому руйнуванні  $t \geq t_a$  до кристалічного блискучого при крихкому руйнуванні  $t \leq t_{кр}$ . Поріг холодноломкості позначають інтервалом температур  $t_a - t_n$  або однією температурою  $t_{50}$ , при якій в зломі зразка є 50 % волокнистої складової, а величина КСТ знижується наполовину.

Про придатність матеріалу для роботи при заданій температурі судять по температурному запасу в'язкості, який визначається по різниці температур експлуатації і  $t_{50}$ . При цьому, чим нижча температура переходу в крихкий стан по відношенню до робочої температури, тим більший є температурний запас в'язкості і вище гарантія від крихкого руйнування. У випадку, коли ударна

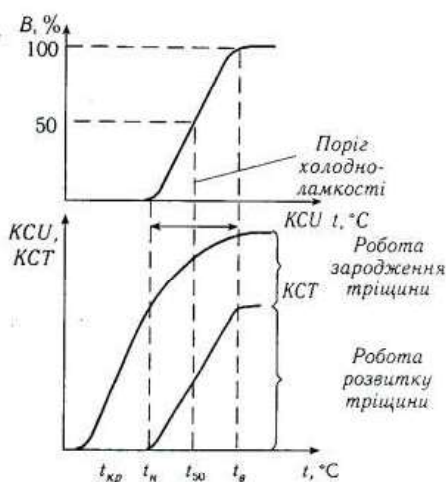


Рис. 129. Вплив температури випробування на відсоток в'язкої складової в зломі  $B$  і ударну в'язкість матеріалу  $KCU, КСТ$

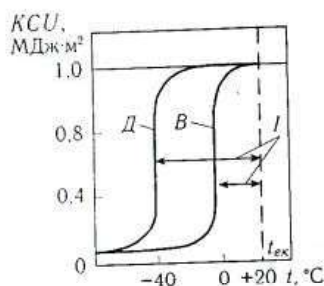


Рис. 130. Залежність ударної в'язкості від температури випробування сталі з вмістом 0,22 і% С  
Д — дрібнозерниста; В — великозерниста; І — температурний запас в'язкості

в'язкість двох сталей при температурі 20 °С є однаковою (рис. 130), при низьких температурах ударна в'язкість є різною. Перехід в крихкий стан сталі Д (дрібнозерниста) закінчується при -40 °С, а сталі В (великозерниста) при 0 °С. У порівнянні із температурою експлуатації  $t_{ек}$ , запас в'язкості сталі Д складає 60 °С, а в сталі В — 20 °С. Сталь Д є більш надійною в роботі, так як можливе зниження температури експлуатації відносно розрахункової при наявності тріщин і ударного навантаження не викликає в ній крихкого руйнування.

Для виробів, що вимагають високих значень  $KCU$ ,  $KCT$  і  $K_{IC}$ , низького порогу холодноламкості, які працюють при низьких температурах з високими швидкостями прикладання навантаження і при наявності концентраторів напружень, необхідно застосовувати дрібнозернисті, спокійні сталі, леговані нікелем і молібденом.

Найбільш низьку надійність (рис. 131) мають сталі звичайної якості після гарячої прокатки Ст. 2, Ст. 3, Ст. 4 та ін. з ферито-перлітною структурою.

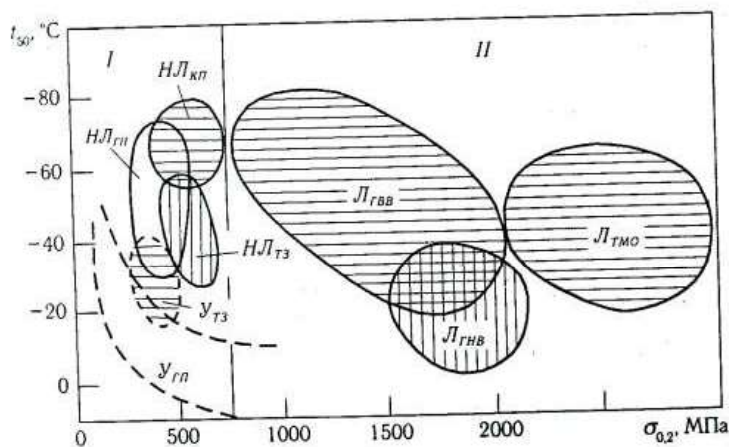


Рис. 131. Діаграма конструкційної міцності будівельних I і машинобудівних сталей II за М. І. Гольдштейном  
I — < 0,2% С; II — 0,2—0,5% С;  $Y_{гп}$ ,  $Y_{тз}$  — вуглецеві після гарячої прокатки і термічного зміцнення;  $HЛ_{гп}$ ,  $HЛ_{тз}$  і  $HЛ_{кп}$  — низьколеговані сталі після гарячої прокатки, термічного зміцнення і контрольованої прокатки;  $Л_{гнв}$ ,  $Л_{гвв}$  і  $Л_{тмо}$  — леговані сталі після гартування і низького відпуску, гартування і високого відпуску і термомеханічної обробки



Чим більший в них вміст вуглецю, тим вище  $\sigma_{0,2}$  і  $t_{50}$ . Термічне зміцнення вуглецевих сталей підвищує границю текучості і дещо знижує поріг холодноламкості  $U_{T3}$  (рис. 131).

Низьколеговані сталі мають більш високу конструкційну міцність, після гарячої прокатки і нормалізації. Після термічної обробки низьколегованих сталей зростає границя текучості  $\sigma_{0,2}$ , а поріг холодноламкості  $t_{50}$  практично не змінюється. Верхня частина області низьколегованих сталей після гарячої прокатки  $НЛ_{гп}$  відноситься до сталей із карбідним зміцненням 14Г2АФ, 15Г2СФ та ін., а нижня до сталей 14Г2, 10Г2С1, 15ХСНД. Високу конструкційну міцність мають низьколеговані будівельні сталі після контрольованої прокатки  $НЛ_{кл}$ . Машинобудівні леговані сталі після гартування і низького відпуску мають високу міцність, але є схильні до крихкого руйнування  $L_{гнв}$  (рис. 131). Покращення в залежності від темпераури відпуску і складу сталі забезпечує низький поріг холодноламкості при достатній міцності  $L_{гвв}$ . Найкращий комплекс механічних властивостей  $\sigma_{0,2}$ ,  $t_{50}$  леговані сталі мають після термомеханічної обробки  $L_{гмо}$  (рис. 131).

### Втомна міцність

Багато деталей машин працюють в умовах, коли виникають навантаження, що змінюються в часі. Працездатність зубчастих коліс, валів, осей залізничних вагонів, колінчастих валів, рам транспортних і вантажопідйомних машин та інших деталей визначає опір втомі. Розрахунки опору втомі цих деталей при стаціонарному навантаженні ведуть по границі витривалості із врахуванням конструкційних і технологічних факторів. Для оцінки характеристик опору втомі натурних деталей проводять їх втомні випробовування для визначення границі витривалості деталей  $\sigma_{-10}$ . Значення  $\sigma_{-10}$  в 2—6 раз менше  $\sigma_{-1}$ , визначеної на зразках. Ця різниця характеризується коефіцієнтом зниження границі витривалості  $K$ , який оцінює вплив всіх факторів на опір втомі:

$$K = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-10}}.$$

Коефіцієнт  $K$  при розтягу стиску або згині визначають за ГОСТ 25504:

$$K = \left( \frac{K_{\sigma}}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_v}.$$

Параметри, що входять у вираз для коефіцієнта  $K$ , враховують вплив концентратора напружень  $K_{\sigma}$ , масштабний фактор (розмір поперечного перерізу)  $K_{d\sigma}$ , якість обробки поверхні  $K_{F\sigma}$ . Чим ближче до одиниці значення  $K_{\sigma}$ ,  $K_{d\sigma}$ ,  $K_{F\sigma}$  і більше коефіцієнт зміцнення поверхні  $K_v$ , тим менше вплив цих факторів на несучу здатність деталі.

Концентрації напружень виникають у галтелей при переході від одного перерізу валу до іншого, галтелей основи зуба шестерні, біля дна рівчака різби,

шпоночного паза, біля отвору в деталях та ін. Фактичне зниження границі витривалості деталі внаслідок концентрації напружень характеризується коефіцієнтом

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1d}}{\sigma_{-1\varnothing}}$$

де  $\sigma_{-1d}$  — границя витривалості зразка без концентрації напружень, діаметр якого  $d$  співпадає з розміром поперечного перерізу деталі.

Для розрахунку на витривалість має значення і теоретичний коефіцієнт напружень  $\alpha_{\sigma}$

$$\alpha_{\sigma} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n}$$

який показує у скільки разів максимальне напруження в зоні концентрації  $\sigma_{max}$  перевищує номінальне. Вважають, що якщо в зоні концентрації напруження виросло в  $\alpha_{\sigma}$  разів, у стільки ж раз понизиться  $\sigma_{-1\varnothing}$ . Така залежність має місце при діаметрі  $d > 40$  для зразків і деталей із сталей, що мають  $\sigma_s > 1000$  МПа і  $\alpha_{\sigma} < 2$ . В інших випадках мають місце відхилення. Тому велике значення для підвищення опору втомі має оптимізація форм виробів з метою зниження концентрації напружень. Для зниження концентрації напружень необхідно надавати деталям плавні обриси, округляти внутрішні кути, застосовувати розвантажувальні рівчаки (отвори), розміщати джерела концентрації в зонах малих номінальних напружень або зміщати максимум місцевих напружень від різних джерел.

Якість обробки поверхні суттєво впливає на опір втомі: нерівності, що утворюються від механічної обробки є джерелами концентрації напружень. Вони знижують границю витривалості, і їх вплив враховується коефіцієнтом

$$K_{F\sigma} = \frac{\sigma'_{-1}}{\sigma_{-1}}$$

де  $\sigma'_{-1}$  — границя витривалості зразка із данною шорсткістю;

$\sigma_{-1}$  — границя витривалості зразка із полірованою поверхнею.

У порівнянні із полірованими зразками сталі ( $\sigma_s = 1000$  МПа) границя витривалості шліфованих зразків знижується на 10—15 %, а фрезерованих на 45—50 %.

Із збільшенням перерізу деталі (масштабний фактор)  $\sigma_{-1}$  знижується, що є наслідком впливу металургійних і технологічних факторів.

Масштабний фактор характеризується коефіцієнтом

$$K_{d\sigma} = \frac{\sigma_{-1d}}{\sigma_{-1}}$$

де  $\sigma_{-1d}$  — границя витривалості зразка великого діаметра,

$\sigma_{-1}$  — границя витривалості гладкого зразка з  $d = 7,5$  мм.

Встановлено, що для  $d = 50$  мм  $K_{d\sigma} = 0,85$ , тобто  $\sigma_{-1}$  знижується на 15 %, а для  $d = 200$  мм  $K_{d\sigma} = 0,6—0,7$  і  $\sigma_{-1}$  знижується на 30—40 %.

Границя витривалості зростає із збільшенням  $\sigma_s$  і  $\sigma_{0.2}$ , але у високоміцних сталей, які більш чутливі до концентраторів напружень, границя витривалості може бути знижена (рис. 132).

У високоміцних сталей зростає коефіцієнт зниження границі витривалості  $K$  внаслідок збільшення коефіцієнта чутливості до концентраторів напружень  $K_\sigma$  по мірі росту  $\sigma_{0.2}$  і зниження коефіцієнтів  $K_{d\sigma}$  (масштабний фактор)

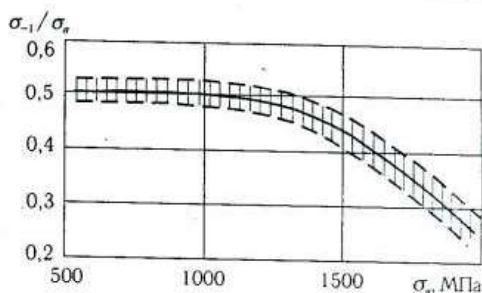


Рис. 132. Залежність відношення  $\sigma_{-1}/\sigma_s$  від границі міцності сталі

і  $K_{F\sigma}$ , який враховує якість обробленої поверхні. Понижується і в'язкість руйнування  $K_{1c}$ , а також опір росту втомної тріщини (живучість). Це необхідно враховувати, коли із міркувань зниження маси конструкції вибирають сталь з високим  $\sigma_{0.2}$ .

Компромісне рішення в даному випадку полягає в тому, щоб серед кількох сталей вибрати сталь з більш низьким  $\sigma_{0.2}$ . Це веде до деякого збільшення маси конструкції, але підвищує границю витривалості, живучість і опір крихкому руйнуванню. Можливе і застосування більш дорогих сплавів, або сплавів після термомеханічної обробки. Наявність на поверхні напружень стиску утруднює утворення втомних тріщин, призводить до підвищення границі витривалості і живучості. Для підвищення границі витривалості і зменшення впливу концентраторів напружень широко застосовують гартування при індукційному нагріві, хіміко-термічну обробку, пластичну поверхневу деформацію і інші технологічні процеси, що зміцнюють поверхню і створюють на поверхні залишкові напруження стиску.

Різні види обробки суттєво впливають на коефіцієнт зміцнення  $K_\sigma$  (табл. 27).

Таблиця 27

Залежність  $K_\sigma$  від методу обробки і коефіцієнта  $K_\sigma$  для валів

| Вид обробки поверхні                              | $\sigma_s$ , МПа<br>(серцевини) | Коефіцієнт зміцнення $K_\sigma$ |                     |                      |
|---|---------------------------------|---------------------------------|---------------------|----------------------|
|   |                                 | $K_\sigma = 1$                  | $K_\sigma \leq 1,5$ | $K_\sigma = 1,8-2,0$ |
| Поверхнєве гартування<br>при індукційному нагріві | 600—800                         | 1,5—1,71                        | 1,6—1,8             | 2,4—2,8              |
|   | 800—1000                        | 1,3—1,5                         | —                   | —                    |
| Цементация  | 400—600                         | 1,8—2,0                         | 3                   | —                    |
|   | 700—800                         | 1,4—1,5                         | —                   | —                    |
|   | 1000—1200                       | 1,2—1,3                         | 2                   | —                    |
|   | 900—1200                        | 1,1—1,3                         | 1,5—1,7             | 1,7—2,1              |
| Азотування  | 900—1200                        | 1,1—1,3                         | 1,5—1,6             | 1,7—2,1              |
| Дробоструменева обробка                           | 600—1500                        | 1,1—1,3                         | 1,3—1,5             | 1,6—2,0              |
| Обкатування роликми                               | —                               | 1,1—1,3                         | 1,3—1,5             | 1,6—2,0              |



Після поверхневої обробки вогнище втомного руйнування зміщується під зміцнений шар. Чим більше  $K_v$  тим ефективніше поверхнєве зміцнення. Із збільшенням перерізу виробу (масштабний фактор  $K_{d\sigma}$ ) коефіцієнт  $K_v$  після поверхневого гартування, хіміко-термічної обробки і поверхневої пластичної деформації зменшується. При оптимальних режимах зміцнення  $\alpha_\sigma < 3$  для попередніх розрахунків  $K_v$  визначають за формулою:

$$K_v = 1,1 + 0,3(\alpha_\sigma - 1)$$

Для більш точних розрахунків  $K_v$  використовують експериментально отримані дані по впливу зміцнення на  $\sigma_{-1}$ .

Вибір того чи іншого методу зміцнення залежить від умов експлуатації деталі, характеру виробництва, форми, розмірів і матеріалу деталі та інших факторів. Всі види корозії знижують  $\sigma_{-1}$ . Вплив корозії оцінюється коефіцієнтом

$$K_{кор} = \frac{\sigma_{-1кор}}{\sigma_{-1}}$$

Із врахуванням впливу корозії коефіцієнт  $K$  визначають за формулою:

$$K = \left( \frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_{кор}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_v}$$

Границю витривалості деталі визначають за формулою:

$$\sigma_{-1d} = \frac{\sigma_{-1}}{K}$$

де  $\sigma_{-1}$  — границя витривалості зразка  $d = 7,5$  мм, який виготовлений із заготовки такого ж розміру, як і деталь.

### Опір зношуванню

В багатьох випадках вихід з ладу деталей машин пов'язаний із зношуванням, яке веде до втрати точності, підвищення амплітуди змінних навантажень, що викликає втомне руйнування.

Зношування — це процес поступового руйнування поверхневих шарів матеріалу шляхом відділення його частинок під впливом сил тертя. Зношування призводить до зміни розмірів, зменшення об'єму або маси деталі.

Працездатність матеріалів в умовах тертя залежить від трьох груп факторів:

- внутрішніх, що визначаються властивостями матеріалу;
- зовнішніх, які характеризують вид тертя (ковзання, кочення) і режим роботи (швидкість відносного переміщення, навантаження, характер його прикладення, температура);
- робочого середовища і змащувального матеріалу.

Під дією сил тертя відбувається багатократне деформування ділянок контактної поверхні, їх зміцнення і знеміцнення, виділення теплоти, зміна структури, розвиток процесів втоми, окислення та ін.

Згідно молекулярно-кінетичної теорії тертя за рахунок шорсткості дотик поверхонь виникає в окремих плямах контакту, що утворюються від взаємного втиснення мікронерівностей, або їх пластичного змяття.

Взаємодія поверхонь в цих плямах має подвійну природу — деформаційну і адгезійну. Деформаційна взаємодія обумовлена багатократним деформуванням мікрооб'ємів поверхневого шару нерівностями. Опір цьому деформуванню називають деформаційною складовою сили тертя  $F_d$ . Адгезійна взаємодія пов'язана із утворенням на ділянках контакту адгезійних містків зварювання. Опір зрізу цих містків і формування нових визначає адгезійну складову тертя  $F_{ad}$ . Таким чином, сила тертя  $F$ , як і коефіцієнт тертя  $f$ , що рівний відношенню сили тертя до нормального навантаження  $N$  ( $f = F/N$ ), визначається як сума двох складових:

$$F = F_d + F_{ad};$$

$$f = f_d + f_{ad}.$$

Деформаційна складова тертя росте пропорційно величині відносного втиснення нерівностей  $h/R$ , де  $h$  — глибина втиснення,  $R$  — радіус втисненої нерівності. Величина  $h/R$  і відповідно  $F_d$  і  $f_d$  ростуть із збільшенням шорсткості поверхні, навантаження і знижуються із збільшенням твердості і модуля пружності матеріалу. Розділяють три види механічної взаємодії:

- пружне контактування (рис. 133, а);
- пластичне деформування (рис. 133, б);
- мікрорізання (рис. 133, в);
- схоплення і виривання (рис. 133, г, д);

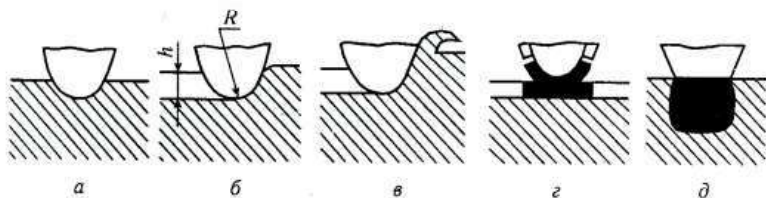


Рис. 133. Види взаємодії поверхонь тертя:

- а — пружне контактування; б — пластичне деформування; в — мікрорізання;  
г — схоплення і руйнування поверхневих плівок; д — схоплення і глибоке виривання

Інтенсивність зношування мінімальна при пружному контактуванні. При пластичному деформуванні інтенсивність зношування зростає на декілька порядків. Це обумовлено тим, що ділянки поверхні під впливом пластичної деформації інтенсивно зміцнюються і по вичерпуванню запасу пластичності крихко руйнуються.

Мікрорізання відноситься до недопустимих механізмів зношування, так як викликає інтенсивне руйнування поверхневого шару. Мікрорізання можливе не тільки втисненими нерівностями, але і сторонніми твердими часточками. Такий вид руйнування поверхні називають абразивним зношуванням.

Адгезійна складова тертя пропорційна безрозмірному параметру  $\frac{\tau_0}{HB}$ .

де  $\tau_0$  — міцність на зріз адгезійного зв'язку. Можливі два види адгезійної взаємодії:

- схоплення і руйнування поверхневих плівок (рис. 133, з);
- схоплення металічних поверхонь, яке супроводжується заїданням, тобто глибинним вириванням (рис. 133, д). Руйнування поверхонь тертя при схопленні (заїданні) називають адгезійним зношуванням. Це найбільш небезпечний вид зношування, який є головною причиною відмови в роботі вузлів тертя.

На основі молекулярно-кінетичної теорії визначено два основних шляхи підвищення зносостійкості металічних матеріалів:

- збільшення твердості взаємодіючих поверхонь;
- зниження міцності адгезійного зв'язку.

Підвищення твердості направлено на те, щоб обмежити пластичну деформацію поверхонь тертя, забезпечити по можливості пружне деформування ділянок контакту. Зниження міцності адгезійного зв'язку необхідно для попередження схоплення металічних поверхонь. Найбільш ефективно ця мета досягається розділенням поверхонь тертя рідким, твердим (іноді газоподібним) змащувачем. При роботі тверді змащувачі матеріали зношуються, а умови рідинного змащування порушуються, що може призводити до схоплення. В цих умовах вирішальне значення має забезпечення сумісності елементів пари тертя. Під сумісністю розуміють властивість матеріалів запобігати схопленню при роботі без змащувального матеріалу. Сумісність досягається кількома способами:

- використанням захисних властивостей плівок, для цього проводять сульфидування і фосфатування поверхонь деталей;
- підбором матеріалів пари тертя, при взаємодії твердого і м'якого матеріалів схоплення відбувається в менш небезпечній формі;
- розділенням поверхонь тертя плівками полімерів, які відрізняються низькою адгезією до металів.

В залежності від механічних і фрикційних властивостей зносостійкі матеріали поділяють на три групи:

- матеріали з високою твердістю поверхні;
- антифрикційні матеріали, що мають низький коефіцієнт тертя ковзання;
- фрикційні матеріали, що мають високий коефіцієнт тертя ковзання.

Із матеріалів з високою твердістю поверхні найбільш поширеними є карбідні сплави, низько- і середньовуглецеві сталі із різними видами поверхневого зміцнення, підшипникові сталі, графітізовані сталі. В умовах дії великих тисків і ударних навантажень використовують високомарганцеві сталі аустенітного класу 110 Г13Л.

До антифрикційних матеріалів відносять сплави, які по структурі поділяють на два типи:

- сплави з м'якою матрицею і твердими включеннями;
- сплави з твердою матрицею і м'якими включеннями.



До сплавів першого типу відносять бабіти і сплави на основі міді — бронзи і латуні. До сплавів другого типу відносять свинцеві бронзи, алюмінієві сплави із оловом і чавуни.

Фрикційні матеріали представляють собою багатокомпонентні неметалічні і металічні спечені матеріали.

Зменшення зношення досягається оптимальною конструкцією вузлів тертя: вибором виду тертя в опорах, системи змащування, створення пристроїв для очищення повітря і змащувального масла та ін., застосуванням зносостійких матеріалів, зміцненням поверхні гартуванням, хіміко-термічною обробкою, наплавленням зносостійкими сплавами, нанесенням на поверхню тонкого шару нітридів або карбідів.

Такі деталі, як підшипники кочення, зуби шестерень, колеса залізничного транспорту, та багато інших деталей працюють в умовах контактної втоми. Контактна втома тим вища, чим більша твердість. Відношення границі контактної втоми  $\sigma_{-1}^K$  при числі циклів навантаження  $N = 10^7$  до твердості  $HRC$  поверхні є постійною величиною

$$\sigma_{-1}^K = K \cdot HRC,$$

де  $K$  — коефіцієнт, який залежить від твердості і виду термічної обробки.

Підвищення границі контактної втоми досягається зміцненням поверхні, підвищенням границі міцності матеріалу, зниженням навантаження в зоні контакту, покращенням чистоти поверхні, а також підвищенням в'язкості мастила.

Перспективним методом підвищення опору зношуванню є формування структури на поверхнях взаємодії, яка відповідає механічній схемі тертя. Контакт, що відбувається в поверхневих шарах при терті проходить на плямах, розмірні характеристики яких і розподіл залежать від матеріалу елементів пари тертя і шорсткості їх поверхонь. Умови мінімального зношування можуть бути досягнуті в тому випадку, коли певні елементи мікроструктури матеріалу контактуючих поверхонь розподіляються у відповідності до схеми розміщення контактних плям. При цьому стійкість цих елементів до зношування буде визначати зносостійкість сплавів.

Для середньовуглецевих сталей підвищення зносостійкості спостерігається після гартування від  $1050^\circ\text{C}$  та наступного відпуску. Вказана термічна обробка приводить до виникнення завдяки різним морфологіям мартенситів та їх відношенню до відпуску скупчень карбідів, які можуть сприяти природному відтворенню відповідності структури параметрам узагальненої моделі контакту при терті.

Вузли тертя найбільш часто виходять із ладу, тому підвищення їх довговічності збільшує довговічність машин.

Надійність конструкцій, що працюють в умовах багатократного піднімання і спадання тиску, залежить від опору матеріалів втомному руйнуванню. Тому для таких виробів проводяться імітувальні циклічні випробування стандартних зразків або циклічні стендові випробування. База випробувань вибирається в залежності від умов експлуатації обладнання.

Метал виробів, які піддаються багаторазовому нагріванню або охолодженню, випробовується на опір термічній втомі.

У випадках довготривалого навантаження конструкцій при високих температурах проводяться випробування на повзучість і довготривалу міцність матеріалу.

### Технологічні властивості

При виборі матеріалів конструктор зобов'язаний враховувати не тільки механічні, фізичні і хімічні властивості, але і технологічні, а також можливості виробництва, де буде виготовлятися виріб, що проектується.

Технологічні властивості (ливарні властивості в ливарних сплавах; здатність до обробки тиском в сплавах, що деформуються; здатність до обробки різанням; зварюваність) є дуже важливими і можуть мати вирішальне значення при виборі матеріалу для виготовлення деталей машин у виробничих умовах. Наприклад, не можна виготовляти литвом тонкостінні довгомірні деталі із сплаву з низькою рідкотекучістю. Не можна також виготовляти зварні конструкції із сталей з високим вмістом вуглецю (високим вуглецевим еквівалентом), так як в зоні зварного шва будуть завжди завжди утворюватись тріщини. Все це необхідно враховувати при виборі матеріалу для конкретного виробу.

При розгляді обробки матеріалів необхідно виходити з умов серійного виробництва виробу і необхідності застосування пом'якшувальної термічної обробки. Це обумовлено використанням в умовах великосерійного або масового виробництва верстатів із ЧПУ, або оброблювальних центрів. В цьому випадку твердість деталей, що оброблюються повинна бути невисокою до *HB* 250. Для забезпечення низької твердості цих деталей може застосовуватись попередня термообробка — відпал, нормалізація, високий відпук.

Оцінку здатності до обробки різанням проводять методом порівняння із здатністю до обробки різанням сталі 45, яку приймають за одиницю. До сплавів що легко обробляються з  $K_0 < 1$  відносять: латуні, бронзи, дуралюміни і чавуни (*HB* 140—160). Здатність до обробки різанням нижче середньої,  $K_0 > 1$ , мають високолеговані сталі аустенітного класу, сталі мартенситного, мартенситно-феритного, аустенітно-мартенситного класів, жаростійкі, кислотостійкі сталі. Здатність до обробки різанням сплавів залежить від їх механічних властивостей, в першу чергу від міцності і твердості. Вона погіршується із збільшенням в сплаві зміцнюючих фаз, неметалічних включень, подрібненням структури, присутністю таких легуючих елементів, як хром і нікель, і збільшенням в'язкості.

Оцінка зварюваності конструкційних матеріалів повинна включати в себе аналіз рівня механічних властивостей зварного з'єднання і основного металу, визначення схильності до утворення дефектів, перш за все тріщин в металі шва і зоні термічного впливу, визначення чутливості зварного з'єднання до концентраторів напружень і схильності до крихкого руйнування. Для отримання бездефектних рівномірних зварних з'єднань, які мають високий опір крихкому руйнуванню, необхідна розробка спеціальної системи легування зварного шва.



Зварюваність металів буває *добра, задовільна, обмежена, незадовільна*.

Добра зварюваність характерна для металічних матеріалів, що не мають обмежень в проведенні процесу зварювання при температурі навколишнього середовища, за масою і складністю конструкцій. Такі матеріали не вимагають попереднього підігрівання.

При задовільній зварюваності, зварювання на морозі не допускають і його проводять при кімнатній температурі. У зварних елементах повинні бути відсутні жорсткі стики; для складних вузлів необхідне попереднє відповідне підігрівання; після зварювання при великому об'ємі наплавленого металу необхідний відпуск; при вварюванні вкладишів необхідно проводити проміжну термічну обробку.

Сплави з обмеженою зварюваністю застосовуються для виготовлення невеликих деталей простої форми з підігрівом до 300—400 °C і проведенням відпуску після зварювання; у випадку жорстких контурів температура підігріву повинна бути збільшена до 600 °C.

Незадовільна зварюваність характерна для матеріалів, що потребують відпалу перед зварюванням; навіть при зварюванні простих вузлів їх необхідно підігрівати до температур більше 450 °C з обов'язковим проведенням високого відпуску після зварювання.

Вибрані матеріали і технології виготовлення з них виробів повинні бути прив'язані до можливостей конкретного виробництва. Не можна використовувати у виробництві хоча і ефективну, але малопоширену технологію, особливо, коли вона не відпрацьована і не освоєна у виробництві. Наприклад, не потрібно орієнтуватись на лазерну термообробку виробів масового виробництва, тому що це технічно не буде реалізовано, а необхідно вибрати один із видів хіміко-термічної обробки, який використовується на підприємстві.

Важливим етапом вибору матеріалу є оцінка його вартості і дефіцитності. Матеріал повинен бути по можливості дешевим з врахуванням всіх затрат, що включають як вартість самого матеріалу, так і вартість виготовлення з нього деталей, а також експлуатаційну стійкість. Необхідно враховувати також наявність дефіцитних складових матеріалів. Наприклад, за останні роки такі елементи сталі як W, Co, Ni є дефіцитними і їх використання як легуючих добавок в сталях повинно бути обмеженим. Але у випадках, коли без них неможна забезпечити необхідні службові властивості, їх застосування доцільно (швидкорізальні сталі, жароміцні сталі і сплави). Таким чином, основою при виборі матеріалів є призначення і умови роботи виробу або конструкції. При цьому конструктор звертається до досвіду виготовлення і експлуатації виробів і конструкцій даного профілю, рівня технології виробництва і контролю, а також враховує економічні міркування. При виборі матеріалів велике значення можуть мати результати стендових, або натурних випробувань виробів. Використання при виборі матеріалів аналогічних матеріалів, які добре зарекомендували себе в подібних конструкціях є доцільним, але може привести з однієї сторони до відмови від вдосконалення конструкцій і виробів, а з іншої — до повторення вже зроблених помилок.



Конструктор повинен чітко представляти необхідність використання матеріалу, можливість його заміни, технологічні особливості виготовлення виробів із вибраного матеріалу і методи їх контролю.

Але для цілого ряду виробів нової техніки, особливо спеціального призначення, є необхідним не вибирати матеріали з існуючих, а розробляти принципово нові матеріали з більш високим комплексом властивостей, яких раніше не було в серійних матеріалах. У цьому випадку використовуються принципово нові методологічні підходи до визначення матеріалів і технологій їх обробки для такої техніки.

### Врахування економічних вимог

Фактори, які визначають техніко-економічну ефективність застосування тих чи інших сплавів чорних і кольорових металів в кожному конкретному випадку будуть свої, але можна вказати декілька загальних положень, що визначають технічну і економічну доцільність застосування сплавів.

На ефективність застосування сплавів для виготовлення виробів і конструкцій впливають наступні техніко-економічні фактори: отримання нових експлуатаційних і технологічних властивостей металу (наприклад, корозійна стійкість, жароміцність, здатність до зварювання, штампування, обробки різанням); забезпечення необхідної надійності і довговічності (холодостійкість, зносостійкість, опір втомі тощо); зменшення маси (ваги); зниження витрат на виготовлення, монтаж, транспортування і експлуатацію.

При використанні легованих сталей часто має місце одночасна дія декількох техніко-економічних факторів.

Вибір тієї або іншої марки сталі для конкретного виробу або конструкції буде раціональним і економічно ефективним, коли сталь при мінімальному легуванні забезпечує необхідний рівень конструкційної міцності, а подорожчання матеріалу в результаті легування і зміни технології виробництва не буде перевищувати економічний ефект, що досягається перерахованими техніко-економічними факторами.

Сплав повинен бути по можливості дешевим з врахуванням всіх витрат, що включають не тільки вартість сталі, але і виготовлення деталей і також їх експлуатаційну стійкість в машинах, в яких вони повинні працювати.

Вартість сталі залежить від вартості елементів, що входять в її склад, яка визначається природними запасами, масштабами і технологією їх промислового виробництва і споживання, кон'юнктурою на світовому ринку. В даний час легуючі елементи можна умовно поділити по ступеню дефіцитності на відносно недефіцитні — Mn, Si, Cr, Al, Ti, V, B і дефіцитні — Nb, Mo, Cu, Pb, Ni, W, Ta, Co.

В першу чергу намагаються застосовувати менш дорогі сталі вуглецеві, або низьколеговані. Леговані сталі застосовують, коли потрібно забезпечити необхідну надійність і довговічність (високу в'язкість руйнування, низький поріг холодноламкості, високу прогартуваність, опір втомі, зносостійкість), отримання особливих властивостей (корозійної стійкості, жароміцності, магнітних властивостей), покращення

шення технологічних властивостей (оброблюваності різанням, здатності до штампування тощо), а також понизити розхід металу на одиницю готової продукції або підвищити потужність машини. Застосування легованої сталі повинно бути технічно і економічно доцільним, коли воно дає економічний ефект за рахунок підвищення довговічності деталей і зменшення розходу запасних частин і, таким чином, економії металопродукату.

Ці загальні вимоги до сплавів в багатьох випадках є суперечливі. Так, більш міцні металічні матеріали мають гірші технологічні властивості, важче обробляються при різанні, холодному об'ємному штампуванні, зварюванні. Рішення при виборі сталі є компромісним між вказаними вимогами. В загальному машинобудуванні переважно вибирають спрощення технології і зниження трудоемності в процесі виготовлення деталі, не рахуючись з деякою втратою властивостей і збільшенням маси деталі. В спеціальному машинобудуванні, де проблема міцності, або питомої міцності відіграє вирішальну роль, вибір сплаву і наступна термічна обробка розглядаються із умов досягнення тільки максимальних експлуатаційних властивостей. Разом із тим у машинах слід досягати рівної довговічності деталей.

При вирішенні питання про вибір сталі для отримання необхідних механічних властивостей та інших характеристик слід встановити оптимальний вид зміцнюючої термічної або хіміко-термічної обробки.

Питання вибору матеріалу і технології термічної обробки слід розглядати по відношенню до конкретних виробничих умов. Один і той же процес термічної обробки в різних виробничих умовах призводить до різних економічних результатів. На економічність і технологічність процесів впливають об'єм випуску продукції, використання енергоресурсів, можливість створення або застосування обладнання та інші організаційно-економічні умови виробництва.

В більшості випадків розглядається можливість застосування кількох марок сталей і способів зміцнення. Це дозволяє обрати найбільш раціональний варіант, що забезпечує досягнення поряд з високими експлуатаційними властивостями деталі хорошої технологічності при виконанні механічної і термічної обробки.

## ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМНИХ ПІДХОДІВ ПРИ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЙ ОБРОБКИ СПЛАВІВ

Підвищення конструкційної міцності серійних сплавів і створення сплавів з більш високим комплексом властивостей вимагає використання нових методологічних підходів. Ці методи повинні включати в себе сукупність металознавчих, технологічних і виробничих аспектів, практична реалізація яких гарантує необхідний рівень службових властивостей сплавів і їх надійність. Для вибору матеріалів і технологій їх обробки при виготовленні деталей машин є обов'язковим встановлення складних взаємозв'язків хімічний склад — технологія — структура — властивості — надійність (рис. 134).



Рис. 134. Фактори, що визначають рівень службових властивостей сплавів

Надійність і довговічність металічних матеріалів, деталей машин і конструкцій, які виготовлені з них визначається структурою.

Структура металів сплавів розглядається на наступних основних рівнях ієрархії:

- макроструктура, будова взірця, заготовки або деталі, що виявляється неозброєним оком або при невеликих збільшеннях до 30 разів;
- мікроструктура, будова зерен, окремих структурних складових, їх склад, розміри і взаємне розміщення;
- субструктура, особливості внутрішньої будови зерен, групі дислокаційні побудови, які визначають поняття полігону, комірки, блоку; ці категорії об'єднують зеренні і міжзеренні деталі із їх дислокаційним походженням;
- міжатомна структура, будова кристалічних решіток, різні точкові і лінійні дефекти кристалічної будови металів.

По своїй масштабності в загальному об'ємі всіх структур субструктура займає головне місце. Розміри зерен складають  $1 \cdot 10^{-4}$  м, розміри дислокацій (ширина) —  $1 \cdot 10^{-9}$  м, і, відповідно, на долю субструктури або дислокаційних угруповань приходить проміжок у п'ять порядків.



Такі показники як експлуатаційна надійність і довговічність є структурно-чутливими, тому науковий підхід до їх покращення полягає у створенні оптимальних структур, що забезпечують підвищення експлуатаційних властивостей виробів із цих сплавів. Залежність різних властивостей від їх структури є складною. Наприклад у деяких випадках зміна границі текучості і тріщиностійкості, при подрібненні фаз сплаву, протилежна. Тому вирішення проблеми створення оптимальної структури сталей вимагає деталізації всіх рівнів її ієрархії, визначення кількісних характеристик елементів структури, встановлення їх зв'язку із властивостями.

Зерна, які характеризуються розмірами, конфігурацією і утворюють конгломерати із певними особливостями будови в окремих об'ємах заготовки є базовими елементами структури полікристалічних матеріалів.

В межах окремого зерна металів і сплавів виділяються такі елементи як субзерна, фрагменти, блоки, полігони, області когерентного розсіювання (рис. 135, табл. 28).

Субзерна представляють собою зеренні підрозділи із збільшеною (у порівнянні із блочною) розорієнтацією і розділені малокутовими межами нахилу, кручення або змішаними. Субзерна можуть складатись із системи блоків, фрагментів або не мати внутрішніх підрозділів.

Фрагменти, блоки, полігони це розорієнтовані області зерна, поділені малокутовими межами дислокаційної природи. Межі складаються із ділянок границь нахилу, кручення або їх змішень, субграниць нахилу складаються із системи дислокацій одного знаку у вигляді вертикальних стінок, кручення — із системи сіток гвинтових дислокацій. Розмежування понять «фрагмент», «блок», «полігон» полягає у походженні цих локальних об'ємів зерна. Фрагменти виникають при розвиненій пластичній деформації металу в холодному стані в результаті ротаційних складових пластичної деформації. Блоки виникають при кристалізації і деформації, їх утворення є наслідком дисипації внутрішніх напруг. Полігони з'являються при розвитку полігонізації — процесу перебудови дислокацій при нагріві після холодної пластичної деформації, або в результаті динамічної полігонізації яка відбувається за час пластичної деформації в певному інтервалі підвищених температур.

Області когерентного розсіювання ідентифікуються з малими ділянками зерна 10—1000 Å, які різноорієнтовані на невеликі кути і характеризуються зниженою інтенсивністю рентгенівських інтерференцій.

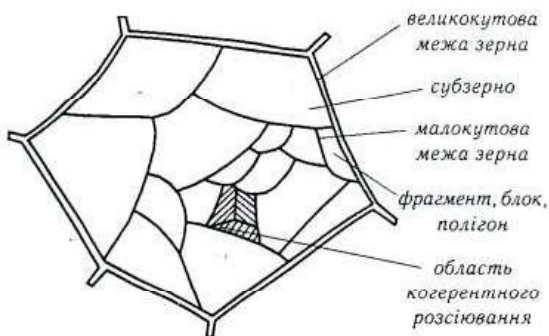


Рис. 135. Елементи будови зерна різного рівня ієрархії сплавів

Розмірні характеристики елементів, що входять в склад зерна металів і сплавів

| Назва елемента                   | Характеристика елемента             |                                    |
|----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
|                                  | Середній розмір, $10^{-2}$ м        | Кут розорієнтування між елементами |
| Зерно                            | $1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^{-2}$ | $0 - 180^\circ$                    |
| Субзерно                         | $1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-4}$ | $1 - 5^\circ$                      |
| Фрагмент, блок, полігон          | $1 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-5}$ | $20 - 60^\circ$                    |
| Область когерентного розсіювання | $1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-7}$ | $10 - 60^\circ$                    |

В металах і сплавах перераховані елементи структури виявляються в різних сполученнях, їх розміри змінюються в широких межах. Більш важливою характеристикою цих елементів є їх розорієнтованість. Якщо окремих об'єм повернутий відносно іншого на кут більше  $15^\circ$ , то його слід віднести до зерна. Окремі зерна поділені малокутовими межами, які побудовані системою межових дислокацій. Межі полігонів і фрагментів побудовані із дислокаційних систем одного знаку, що утворюють межі нахилу і кручення.

В зв'язку із складністю структури стають актуальними питання розробки і використання засобів інтелектуальної підтримки, які необхідні для моделювання і комп'ютерного аналізу будови металів і сплавів у всьому діапазоні її якісної багатогранності. Ці засоби повинні задовільняти умовам адекватності і бути достатніми для досягнення мети досліджень. Вони базуються на принципах системного аналізу, і дозволяють створювати моделі структури із врахуванням її гетерогенності, дискретності будови на різних за масштабом рівнях і в той же час спрощують складність її опису. Системні підходи дають можливість об'єднувати різнопланові відомості про хімічний склад, структуру і технології обробки сплавів, відкривають можливості більш широкого застосування електронно-обчислювальної техніки.

Використання системного аналізу при розробці нових сплавів і технологій їх обробки відноситься до найбільш складних завдань, що вирішуються сучасним матеріалознавством. Це обумовлено недостатньою розробленістю методів досліджень у необхідному об'ємі. Складність використання системних методів в тому, що замість чіткої регламентованої методики існує набір абстрактних метатеоретичних закономірностей. Підбір комбінацій елементів і визначення ефективності використання цього набору і є завданням досліджень.

При системному аналізі таких складних і багатоякісних об'єктів, якими є метали і сплави кращі результати досягнуті на основі теорії гіперкомплексних динамічних систем (ГДС), що розроблена О. М. Малютою. Автором запропонована концепція інваріантного моделювання тобто принципи і закономірності побудови системних моделей, які не залежать від природи об'єктів, що досліджуються. Для характеристик цих моделей використовують основні елементи



властивості об'єктів (елементний склад, взаємодію елементів, структурність, ієрархічність). Так як ці системні властивості є присутніми для об'єктів різної природи, то їх називають системними інваріантами, а моделювання — інваріантним.

Елементи системи розглядаються як складові її частини, які відрізняються за якістю. Кількість елементів визначає порядок системи. Визначальним моментом теорії гіперкомплексних динамічних систем є якісна різновидність елементів, спираючись на яку можна більш глибоко аналізувати явища, моделювати і вивчати феноменологічну суть досліджуваного процесу за допомогою формалізованих до рівня алгоритму методів і підходів.

Наявність елементів, що утворюють систему передбачає зв'язок між ними, який називається взаємодією елементів. При цьому кількість зв'язків одного елемента визначається порядком системи. Розгляд системи, як ізольованого утворення вимагає щоб взаємозв'язок елементів був реалізований за рахунок внутрішніх ресурсів системи, тобто взаємного перетворення по якості її елементів.

Сукупність елементів і зв'язків між ними утворюють структуру системи. Термін структура містить в собі архітектурні властивості системи.

Кожен із елементів, які входять в гіперкомплексну динамічну систему має властивості, що відрізняють його від інших елементів. Сукупність елементів також може мати властивості, яких не може бути в кожного з окремо взятих елементів. Тобто наявність елементів і взаємодій між ними може привести до виникнення нових властивостей у сукупності елементів, які розглядаються, як одне ціле. Сукупність цілісних властивостей системи, їх особливості і закономірності характеризують емергентність системи. Емергентні властивості — це особливості цілого, що відрізняються від властивостей частин, які його складають і виділяють це ціле, як нову системну одиницю.

Окремі елементи, об'єднуючись в ціле, утворюють систему, яка проявляє свої емергентні властивості, може також розглядатись як елемент, що має свою внутрішню структуру. Складні елементи шляхом взаємодії також можуть створювати систему, яку доцільно розглядати як нове утворення, елементи якого самі є системами. Існування систем пов'язано із ієрархічністю, наявністю сукупності внутрішньосистемних рівнів і їх властивостей, закономірностей їх утворення і існування.

Для полегшення досліджень проводять процес ідеалізації, при реалізації якого виконують дві умови:

- об'єкт розглядають ізольовано;

- при дослідженні враховують не всі, а тільки важливі для мети дослідження властивості об'єкта, що вивчається.

Для виділення найбільш суттєвих властивостей об'єкта що досліджується замість об'єкта вивчають його еквівалент — модель, яка є спрощеним ідеалізованим відбиттям об'єкта.

Розглядаючи модель, як робочий еквівалент об'єкта, необхідно добитись, щоб об'єкт і його модель були рівнозначними по властивостях, що досліджуються.

Наявність моделі, в якій свідомо враховані не всі, а лише необхідні основні властивості і умовність поняття ідеальної замкненості приводить до виникнення



неповноти, тобто до того, що система (об'єкт) дослідження задовільняють тільки частині з даних умов і властивостей.

Системний підхід передбачає розгляд будь-якого об'єкта, як системи, і його слід співвідносити з кінцевою метою дослідження. На стані моделювання системний підхід проявляється в побудові системної моделі об'єкта, тобто модель будь-якого об'єкта розглядається як система. В символічному вигляді гіперкомплексну динамічну систему описують рівнянням

$$S = \sum_i S_i,$$

де  $i = 1, 2, 3$

$S$  — системна модель;

$S_1$  — елементний склад системи;

$S_2$  — відображає наявність і характер зв'язків між елементами системи;

$S_3$  — відображає структурні властивості системної моделі.

Так як структура металічних матеріалів визначає їх службові властивості, то системний аналіз структури вимагає її вивчення на різних рівнях ієрархії (рис. 136).

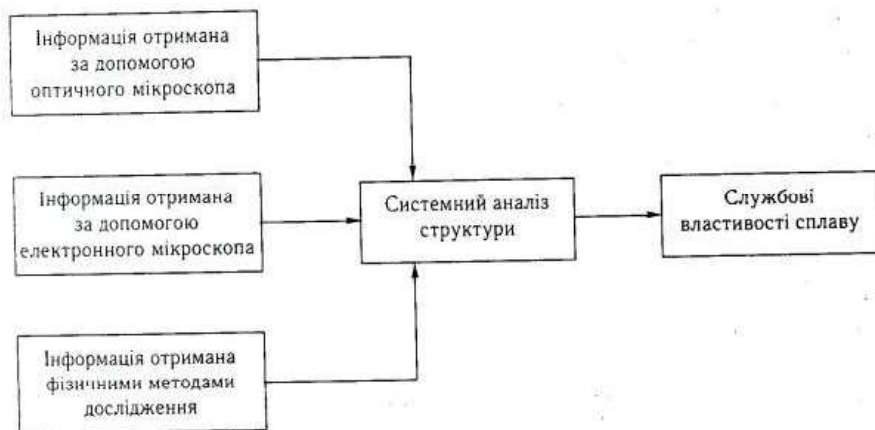


Рис. 136. Схема аналізу впливу структури на властивості сплавів

При розробці системних моделей структури металічних матеріалів системний і математичний підходи поєднуються по наступній схемі:

- проводиться аналіз мети дослідження;
- формулюються завдання;
- будується модель;
- проводиться вибір і визначення стратегії дослідження;
- проводиться математичне описання системної моделі;
- реалізується модель на рівні числових оцінок;

— розраховуються окремі аспекти системного дослідження у відповідності із заданою стратегією.

Для описання структури металічних матеріалів за допомогою моделей використовують дискретні підходи, в яких елементи системи розглядаються як точки у просторі і передбачається використання матричного і графічного методів представлення елементів і їх взаємодії. Складання матриць інваріантних моделей структури сталей проводиться в наступній послідовності:

— із вихідних даних кількісних характеристик структури, яка аналізувалась, вибираються і групуються в окремі послідовності елементи системи в межах кожного ієрархічного рівня.

— впорядковується послідовність рівнів у вихідній системі.

— з врахуванням відношення елементів до рівнів ієрархії будується квадратна матриця у вигляді таблиці, розмір якої визначається числом елементів у вихідній системі.

Інформація про систему розміщується у матриці. На головній діагоналі надається інформація про елементи системи, зліва і справа від діагоналі розміщується інформація про взаємодію елементів. Цілісні характеристики систем визначаються як детермінанти матриць. Крім матричного зображення використовується графічне зображення систем. При цьому елементи системи представляються колами, а їх взаємодії стрілками. Сукупність елементів і взаємодій утворює структуру системи.

Дослідження сплавів на основі системного підходу передбачає виділення в їх структурі системних властивостей і закономірностей, які вивчаються фізичними методами дослідження. На основі системного підходу розробляються моделі структури сплавів, які при визначенні критичних значень параметрів структури замінюють реальні об'єкти досліджень. Аналіз системних моделей проводиться на основі системологічних концепцій, так і положень матеріалознавства. Вивчення сукупності системних моделей мікроструктури сплавів розгляд їх найбільш загальних системних інваріант дозволяє запропонувати способи побудови моделей структури і області їх застосування при дослідженнях сплавів різного хімічного складу. Загальна форма методологічного циклу дослідження має вигляд: об'єкт — структура сплаву — модель — метод — реалізація — інтерпретація отриманих результатів.

В зв'язку із тим, що системні моделі за параметрами і законами функціонування повинні бути ідентичними об'єктам і явищам, що моделюються при розробці моделей проводиться наповнення системних інваріант конкретним змістом. Враховуючи, що в замкнених гіперкомплексних динамічних системах характер зміни їх елементів по напрямкам є протилежний, для наповнення системних інваріант використовуються параметри структури, вибір яких залежить від мети досліджень.

Системні дослідження сталей проводяться в наступній послідовності:

— для досліджуваного сплаву будується системна модель, яка адекватно відображала б системні властивості її структури.

— на основі аналізу загальних закономірностей системи встановлюються окремі властивості системної моделі.

— встановлюються емпіричні зв'язки між системними властивостями, які характеризуються детермінантом матриці і фізико-механічними властивостями сплаву.

— встановлюється значення матричного параметру, при яких фізико-механічні властивості сталі є оптимальними.

— визначаються границі зміни системних властивостей сталі, які забезпечують отримання оптимального матричного параметру.

В найбільш загальному вигляді операції, що проводяться утворюють наступний алгоритмічний ланцюг:

$$(VD)_0 \rightarrow S_0 \rightarrow S \rightarrow P(S) \rightarrow Res \rightarrow (VD)_R,$$

де  $(VD)_0$  — вихідні дані за результатами якісного аналізу мікроструктури сталі;

$S_0$  — переведення вихідних даних в системоутворююче середовище;

$S$  — гіперкомплексна динамічна система, отримана із  $S_0$ ;

$P(S)$  — обробка системи  $S$  методами теорії гіперкомплексних динамічних систем;

$Res$  — результат, отриманий на системній мові;

$(VD)_R$  — необхідний результат переведений на конкретно-предметну мову матеріалознавства.

Наповнення системних інваріант конкретними характеристиками параметрів мікроструктури сплавів дозволяє розробляти інваріантні моделі мікроструктури, які включають її різноякісні параметри. Моделі піддають абстрактно-логічним дослідженням, при яких процедури вимірювання перетворюють в розрахункові і необхідні характеристики не замірюються, а визначаються розрахунковим шляхом. При оцінці впливу структурних параметрів сплавів на властивості характеристики, знайдент розрахунковим шляхом, перевіряються в ході експериментальних досліджень.

Розглянемо приклад використання системного аналізу при розробці мікролегування сталей, що покращуються. Введення бору ефективно підвищує прогартувальність конструкторських сталей, але зменшує їх опір крихкому руйнуванню після гартування і високого відпуску. Комплексне мікролегування дозволяє одночасно збільшувати прогартувальність і опір крихкому руйнуванню сталей. Але його ефективне використання вимагає врахування багаторівневого характеру поверхонь розділу (наявності різних розмірів зерен і субзерен, блоків мозаїки, областей когерентного розсіювання). Незважаючи на теоретичні знання, розвиток і промисловий досвід застосування малих додатків, їх вплив на енергію, структуру, фазовий і хімічний склад великокутових і малокутових меж зерен, зерених і субзерених стиків, а також схильність сталей до міжзеренного руйнування вивчені недостатньо.

Обґрунтування критеріїв оцінки стану внутрішніх поверхонь розділу (ВНР) вимагає моделювання і комп'ютерного аналізу зон меж зерен. Для вибору раціональних способів підвищення експлуатаційної надійності мікролегованих сталей після гартування і високого відпуску доцільно використати системне моделювання досліджуваних об'єктів.



Із виплавлених в індукційній печі сталей (див. табл. 29) виготовляли прутки і зразки, які гартували після нагріву в соляній ванні до температур 860 °С і відпускали при 600 °С з охолодженням у воді. Частину зразків піддавали вторинному окрихчувальному відпуску при 550 °С протягом 2 годин із наступним повільним охолодженням. Тоді визначали механічні властивості і схильність до крихкого руйнування сталей, яку оцінювали за порогом холодноламкості сталей  $t_{50}$ , випробовуючи зразки на ударний згин при температурах від -120 до +100 °С, на підставі вимірів ударної в'язкості і частки крихкої складової в зломі. Структуру сталей і їх злом вивчали на оптичному та електронному мікроскопах. Оцінювали розмір зерен, сумарну площу поверхонь розділу (міжзеренних границь) і розподіл карбідів. Середню кількість міжзеренних виділень  $\rho_i$  на межі зерна розраховували по електронних фотографіях, отриманих з екстрагованих реплік, за формулою:

$$\rho_i = n / l \cdot r,$$

де  $n$  — кількість частинок на межі довжиною  $l$ ;

$r$  — середній розмір частинок.

Частку меж із певною кількістю карбідів оцінювали їх відношенням до загальної довжини меж зерен  $l/L$ , %.

Для виявлення меж зерен із високою роздільною здатністю використали іонно-плазмове травлення. Глибину рівчиків травлення, зумовлену різною енергією атомів на межах і внутрішніх об'ємах решітки кристалітів, визначали інтерферометром Лінника. Електронною мікроскопією досліджували форму і розміри карбідних виділень за допомогою реплік, екстрагованих із поверхні шліфів і зломів. На зразках, випробовуваних біля верхньої границі холодноламкості  $t_{10}$ , визначали відсоткове співвідношення мікромеханізмів руйнування сталей (див. табл. 29).

Мікролегування суттєво не впливає на міцність і пластичні характеристики сталей після гартування і високого відпуску (в'язкий стан). При введенні бору опір крихкому руйнуванню зменшується і поріг холодноламкості  $t_{50}$  зміщується в бік високих температур на 20 °С. Комплексне мікролегування бором і рідкісноземельними металами, празеодимом і цирконієм (варіанти 3—5) підвищує ударну в'язкість при мінусових температурах, але поріг холодноламкості знаходиться на рівні сталі 40ХГ. Найефективніше діє молибден, присутність якого підвищує ударну в'язкість при мінусових температурах і зсуває поріг холодноламкості бористої сталі 40ХГ в бік низьких температур на 20—25 °С (див. табл. 29). Аналогічні результати отримані після окрихчувального відпуску.

Зміна опору крихкому руйнуванню при введенні малих добавок пов'язана з їх впливом на здатність елементів структури до мікролокальної деформації і характер руйнування сталей. Фрактографія показала, що поверхня макрокрихкої зони зломів ударних зразків складається з мікроділянок ямкового рельєфу, череззеренного та міжзеренного відколу. Введення бору зменшує частку мікрів'язкого руйнування, сприяє міжзеренному руйнуванню і збільшенню розмірів фасеток череззеренного відколу. При мікролегуванні рідкісноземельними металами в зломі бористої сталі з'являються ділянки мікрів'язкого руйнування

з ямками, розміщеними вздовж гребенів відриву. Введення цирконію суттєво не впливає на будову фасеток відколу, але збільшує кількість ділянок ямкового рельєфу. Легування молібденом найефективніше гальмує міжзеренне руйнування.

Таблиця 29

**Вплив мікролегування на критичну температуру крихкості, співвідношення між структурними складовими макрокрихкої ділянки злому і характеристики мікроструктури сталей в покращеному стані і після окрихчувальної обробки**

| Вари-<br>ант | Сталь               | $t_{50}$ ,<br>°C | $t_{10}$ ,<br>°C | Частка мікрорельєфу<br>в макрокрихкій ділянці<br>злому, % |                               |                             | Площа<br>меж<br>зерен,<br>см <sup>2</sup> /см <sup>3</sup> | Кіль-<br>кість<br>потрій-<br>них<br>стиків | Частка меж<br>зерен<br>із глибиною<br>рівчиків<br>травлення<br>понад 0,35 мкм |
|--------------|---------------------|------------------|------------------|---|-------------------------------|-----------------------------|--|--|---|
|              |                     |                  |                  | Ямко-<br>вого,<br>$S_1$                                   | Квазівідкольного              |                             |  |  |   |
|              |                     |                  |                  |   | череззе-<br>ренного,<br>$S_2$ | міжзе-<br>ренного,<br>$S_3$ |  |  |   |
| 1            | 40ХГ                | -50<br>-38       | -40<br>-20       | 9<br>15   | 81<br>27                      | 10<br>58                    | 1449   | 4461                                       | 22<br>32  |
| 2            | 40ХГ                | -30<br>-13       | -20<br>0         | 8<br>6  | 74<br>10                      | 18<br>84                    | 621  | 1894                                       | 46<br>64  |
| 3            | 40ХГР з<br>0,002%В  | -42<br>-26       | -30<br>-5        | 15<br>14  | 74<br>17                      | 11<br>69                    | 664  | 2038                                       | 12<br>30  |
| 4            | 40ХГР з<br>0,02%РЗМ | -52<br>-39       | -40<br>-20       | 15<br>17  | 75<br>22                      | 10<br>61                    | 721  | 2174                                       | 14<br>26  |
| 5            | 40ХГР з<br>0,02%Pr  | -55<br>-42       | -40<br>-10       | 15<br>21  | 77<br>26                      | 8<br>53                     | 969  | 2713                                       | 23<br>13  |
| 6            | 40ХГР з<br>0,17%Zr  | -72<br>-60       | -60<br>-40       | 12<br>19  | 83<br>40                      | 5<br>41                     | 843  | 2192                                       | 18<br>41  |

**Примітка.** В чисельнику подано дані після первинного відпуску, у знаменнику — після повторного.

Кількість фасеток міжзеренного відколу в макрокрихкій ділянці злому зростає при переході від нижнього до верхнього порогу холодноламкості, тому вплив мікродобавок на міжзеренне руйнування визначали при температурі  $t_{10}$  на зразках, що мали 10% макрокрихкої складової  $t_{10}$ . Частка міжзеренного руйнування найбільше зростає в сталі, мікролегованій бором, особливо після окрихчувального відпуску. При введенні рідкісноземельних металів, цирконію і молібдену міжзеренний відкол змінюється на череззеренний (див. табл. 29).

Металографічні дослідження сталі 40ХГ показали, що розмір зерна становить 15—18 мкм, в структурі чітко проявляються великокутові і малокутові межі. При введенні бору розмір зерна підвищується до 35—42 мкм. Після окрихчувального відпуску межі зерен протравлюються сильніше. Рівчики травлення є глибші, ніж в сталі без добавок і у в'язкому, і в окрихченому станах, особливо біля потрійних стиків зерен.



Мікролегування суттєво впливає на рівень енергії меж зерен сталей після покращання, а також окрихчувальної обробки. Аналіз кривих розподілу меж зерен по глибині рівчиків травлення показав, що в сталі 40ХГ межі зерен у в'язкому стані можна поділити на три групи: з глибиною рівчиків травлення 0,15 мкм, 0,25 мкм та 0,35 мкм. В окрихченому стані з'являються межі з глибиною рівчаків 0,45 мкм (рис. 137).

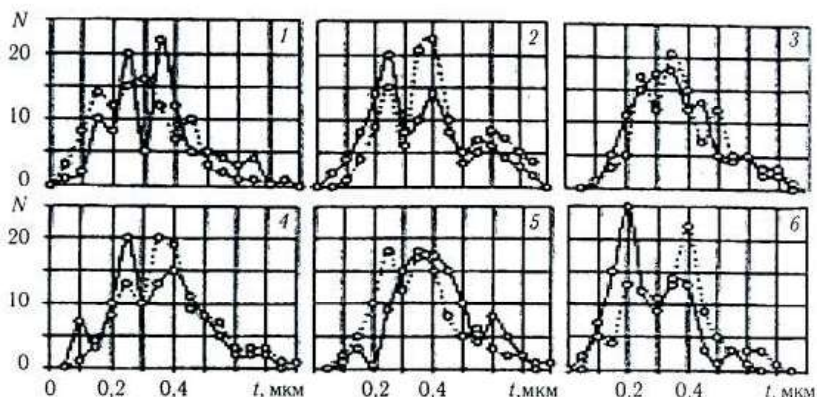


Рис. 137. Залежність кількості меж зерен певної глибини  $N(t)$  від глибини зернограничної рівчика  $t$  для шести варіантів сталей (див. табл. 29). Суцільна лінія — в'язкий стан; штрихова лінія — окрихчений стан.

В сталі 40ХГР (варіант 2) частка меж зерен із глибшими рівчиками після окрихчення зростає майже в два рази порівняно зі сталлю без мікролегування. При введенні РЗМ розподіл меж зерен за глибинами рівчиків однорідніший у в'язкому і в окрихченому станах. В сталі з бором і празеодимом розподіл меж зерен за енергіями аналогічний до сталі 40ХГР. Найбільш впливає комплексне мікролегування бором та цирконієм. В окрихченому стані крива розподілу меж зерен зсувається в бік рівчиків із меншою глибиною порівняно з в'язким станом (рис. 137, варіант 5). У сталі, мікролегованій бором і молібденом, розподіл меж зерен подібний до спостережуваного в бористій сталі з празеодимом.

Структурно-енергетичний стан меж суттєво впливає на процеси карбідотворення під час відпуску. На вугільних репліках виявлено нерівномірний розподіл карбідних виділень розміром 0,05—1 мкм. Після окрихчувальної обробки густина карбідних виділень по межах істотно зростає. В сталі 40ХГ після вторинного відпуску з повільним охолодженням вона удвічі більша, ніж після відпуску з пришвидшеним охолодженням. Мікролегування бором збільшує частку меж зерен із великою кількістю карбідів, а РЗМ, цирконієм і молібденом — зменшує.





Рис. 138. Ріст тріщини по межах зерен із різною глибиною рівчиків травлення в сталі 40ХГ після окрихчувальній обробки

Щоб з'ясувати роль енергії меж зерен у процесі росту тріщини, досліджували сталь 40ХГ після окрихчувального відпуску. В околі вирізу ударного зразка утворили втомну тріщину, вершину якої позначали на певній віддалі пірамідою на приладі ПМТ-3. Біля вершини тріщини та на шляху її можливого росту вимірювали глибину рівчиків по межах зерен. Виявилось, що під статичним згином тріщина поширюється по межах зерен з вищою енергією, які після іонно-плазмового травлення мають глибину понад 0,35 мкм (рис. 138). Оскільки структурно-енергетичний стан внутрішніх поверхонь розділу і карбиди по межах зерен впливають на здатність до мікролокальної деформації і руйнування міжзеренних зон для кількісного опису цих зв'язків розроблені системні моделі структури сталей.

Розглядаючи сталі як об'єкти з системними властивостями, постійними при будь-яких змінах, відібрали найзагальніші системні характеристики-інваріанти. Систему зображали як матрицю, на головній діагоналі якої подано інформацію

про елементи системи  $A_1$ ,  $A_2$ , а обабіч діагоналі — про їх взаємодію  $Y_1$ ,  $Y_2$  (рис. 139). Як системні інваріанти взято такі параметри структури:

- елементами системи були площі границь зерен в інтервалі 12—27 мкм (група  $A_1$ ) та в інтервалі 50—67 мкм (група  $A_2$ ). У сталях із однорідним зерном  $A_1$  і  $A_2$  дорівнювали половині від сумарної площі міжзеренних меж.
- взаємодію між елементами описували площею зерен із глибиною рівчиків травлення понад 0,35 мкм  $Y_{12}$  і протравлених зеренних стиків  $Y_{21}$ .
- узагальнювальною характеристикою елементів системи і їх взаємодії був детермінант матриці  $Y$ .

Після побудови системної моделі структури встановлювали емпіричні зв'язки між системними властивостями, які характеризує визначник матриці і фізико-механічними властивостями сталі. Відтак знаходили границі зміни системних властивостей і значення матричного параметра структури  $Y$ , при яких фізико-механічні властивості сталі є оптимальними. Наповняли системні інваріанти на основі загальної площі меж, меж із підвищеним рівнем енергії і потрібних стиків зерен (див. табл. 29). На підставі результатів досліджень мікроструктури і стану внутрішніх поверхонь розділу розраховували значення матричних параметрів сталей після покращання, а також окрихчувальної обробки.

|          |          |
|----------|----------|
| $A_1$    | $Y_{12}$ |
| $Y_{21}$ | $A_2$    |

Рис. 139. Матрична форма зображення інваріантної моделі структури сталі після покращання.  $A_1$  і  $A_2$  — елементи системи: площа меж зерен різних розмірних груп;  $Y_{12}$  і  $Y_{21}$  — взаємодія між елементами системи: площа меж зерен із глибиною рівчиків понад 0,35 мкм і сумарна площа потрібних зеренних стиків після іонно-плазмового травлення.

Отримані дані використовували для побудови залежності частки міжзеренного руйнування  $S_3$  в зразках, випробуваних при температурі верхнього порогу холодноламкості  $t_{10}$ , від визначника гіперкомплексної матриці  $Y$ . Аналіз показав (рис. 140), що при мікролегуванні схильність до міжзеренного руйнування зростає зі зменшенням визначника матриці. В найбільшій мірі це проявляється в сталі 40ХГР після окрихчувального відпуску. Комплексне мікролегування приводить до зменшення частки міжзеренного руйнування сталей, при цьому визначник матриці  $Y$  зростає.

Обчислювальний експеримент дозволив встановити параметри мікроструктури, при яких відбувається зменшення частки міжзеренного відколу в умовах крихкого руйнування сталей. Ступінь впливу різноякісних елементів структури (зерен і внутрішніх поверхонь розділу) визначається їх відношенням до рівня ієрархії структури. Структурними одиницями, які грають вирішальну роль у процесах міжзеренного руйнування, є межі зеренних конгломератів і стики з вищим рівнем енергії.

Числові оцінки показали, що для сталей, мікролегованих бором, частка міжзеренного руйнування зменшується, коли визначник матриці інваріантної моделі структури більший  $70 \times 10^3 \text{ см}^{-2}$  (рис. 140). Таке значення визначника матриці досягається при величині зерна 20—25 мкм, а також зменшенні кількості карбідів по межах зерен.

Мікролегування тільки бором, збільшуючи розмір зерна, сприяє виділенню карбідів по межах зерен, зростанню частки меж із кількістю карбідів понад  $16 \cdot 10^4 \text{ мм}^{-2}$ , зміщує поріг холодноламкості в бік високих температур і підвищує частку міжзеренного рельєфу в крихкій зоні руйнування. Рідкісноземельні метали збільшують однорідність структури бористої сталі, а кількість карбідів по межах зерен зменшується у 1,5—2 рази. Позитивний вплив цирконію і молібдену пов'язаний зі зменшенням розміру зерна до 25—30 мкм і кількості карбідів по межах зерен, особливо після окрихчувального відпуску.

Отже, використання інваріантних моделей структури дозволяє оцінювати вплив розміру зерен, різнозернистості, потрібних зеренних стиків, міжзеренної енергії, а також розподілу карбідів на опір міжзеренному руйнуванню мікролегованих сталей, вибирати шляхи оптимізації мікроструктури з метою усунення їх окрихчення під час високого відпуску.

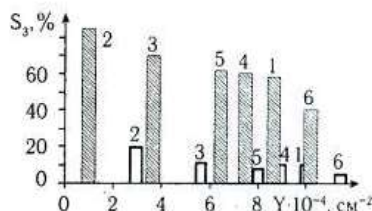


Рис. 140. Вплив мікролегування на визначник матриці  $Y$  і частку міжзеренного руйнування сталей  $S_3$  (див. табл. 29) □ — в'язкий стан; ▨ — окрихчений стан.

## КОРОТКИЙ ТЛУМАЧНИЙ СЛОВНИК З МЕТАЛОЗНАВСТВА

### А

**АБСОРБЦІЯ** — поглинання речовини (абсорбату, чи абсорбованої речовини) з газоподібного середовища всім об'ємом рідких чи твердих тіл (абсорбентів):  
1. Абсорбція протікає на межі газ—метал.  
2. На відміну від адсорбції абсорбція проходить у всьому об'ємі поглиначи.  
3. Швидкість абсорбції залежить від того, наскільки концентрація газу, що поглинається в газовій суміші переважає концентрацію цього компонента над абсорбентом.

**АВТОМАТНА СТАЛЬ** — конструкційна вуглецева сталь з підвищеним вмістом 0,08—0,30 % S і до 0,15 % P, яка застосовується для виготовлення деталей на металорізальних верстатах-автоматах:  
1. Для підвищення міцності автоматні сталі часто піддають холодному протягуванню.  
2. Автоматні сталі використовуються головним чином для виготовлення болтів, гайок, деяких деталей автомобілей, пристроїв і ін.  
3. При обробці автоматної сталі на верстатах-автоматах утворюється крихка, легко віддільна стружка і чисто оброблена поверхня виробів.

**АДГЕЗІЯ** — злипання поверхонь двох різномірних твердих чи рідких тіл: 1. При створенні склопластиків використовується полімер, що має хорошу адгезію до скляного волокна. 2. Для підвищення адгезії в склад клею чи плівкоутвірному полімеру вводять

активні добавки. 3. Адгезія полімерів визначається близькістю їх полярностей.

**АДСОРБЦІЯ** — поглинання речовини (абсорбату) з газоподібного середовища чи рідкого розчину поверхнею твердих чи рідких тіл (адсорбентів): 1. Явище адсорбції тісно пов'язане з особливими властивостями речовини в поверхневому шарі.  
2. В промисловості адсорбцію здійснюють в спеціальних апаратах — адсорберах.  
3. Фізична адсорбція на відміну від хімічної не супроводжується вагомими змінами молекул адсорбованої речовини — абсорбату.  
4. Адсорбція застосовується для розділення газових і рідких сумішей, осушення і очищення газів і рідин.

**АЗОТУВАННЯ** — дифузійне насичення азотом поверхневого шару (0,2—0,8 мм) металевих виробів при нагріванні в атмосфері аміаку для підвищення поверхневої твердості, зносостійкості, границі витривалості, корозійної стійкості: 1. Антикорозійному азотуванню можна піддавати будь-які сталі і чавуни. 2. Для скорочення тривалості процесу застосовують двоступеневе азотування. 3. Азотування здійснюють після механічної і термічної обробки. 4. Азотування широко застосовують в промисловості, в тому числі для деталей, що працюють при температурах до 500—600 °C (гілзи циліндрів, колінчасті вали, деталі паливної



апаратури двигунів і ін.); 5. Азотування застосовується для обробки болтів, тяг, вентилів, деталей приладів.

**АЛІТУВАННЯ** — дифузійне насичення поверхневого шару виробів зі сталі, чавуну і деяких інших сплавів алюмінієм на глибину 0,02—0,8 мм з метою підвищення жаростійкості: 1. Швидкість газового алітування в 4—5 раз більше, ніж алітування в порошкоподібних сумішах. 2. Газове алітування здійснюють в закритих ретортах. 3. Алітуванню піддають різноманітні деталі, що працюють при високих температурах.

**АЛОТРОПІЧНА МОДИФІКАЦІЯ** — різноманітні кристалічні форми однієї речовини: 1. При низьких температурах стабільна алотропічна модифікація  $Sn$  з решіткою алмазу  $Sn_{\alpha}$ , яка при нагріві змінюється модифікацією  $Sn_{\beta}$  з більш слабким металевим зв'язком; 2. Алотропічні модифікації речовини позначаються грецькими буквами  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  і т. д. 3. Перетворення однієї алотропічної модифікації металу в іншу відбувається при певній температурі і супроводжується поглинанням чи виділенням тепла.

**АЛОТРОПІЯ** — існування одного і того ж хімічного елемента у вигляді двох чи кількох простих речовин, різних за кристалічними формами і властивостями: 1. Окрім температурної алотропії деякі речовини змінюють свою кристалічну структуру при підвищенні тиску. 2. Явище алотропії досліджують термічним, магнітним і іншими методами. 3. Алотропія приводить до утворення молекул з різним числом атомів (наприклад, кисень  $O_2$  і озон  $O_3$ ) чи різних кристалічних форм (наприклад, вуглець утворює графіт і алмаз).

**АЛЮМІНІЄВІ СПЛАВИ** — сплави на основі алюмінію: 1. Хімічний склад алюмінієвих сплавів, які обробляють тиском, визначається необхідністю отримання

оптимального комплексу механічних, фізичних і хімічних властивостей. 2. Алюмінієві сплави системи Al-Mg-Si зміцнюються термічною обробкою. 3. Алюмінієві жаростійкі сплави системи Al-Cu-Mn застосовують для виготовлення виробів, які тривалий час працюють при підвищених температурах. 4. Ливарні алюмінієві сплави системи Al-Si відрізняються високими ливарними властивостями і застосовуються для отримання виливків всіма способами лиття.

**АЛЮМІНІЙ** — пластичний метал сріблясто-білого кольору, з малою густиною ( $2699 \text{ кг/м}^3$ ) і низькою температурою плавлення ( $660^\circ\text{C}$ ), стійкий проти корозії (символ Al): 1. Алюміній отримують електролізом розплаву глинозему в суміші з криолітом. 2. Технічний алюміній, що випускається у вигляді деформованого напівфабрикату (листи, профілі, прутки і ін.), маркується АД0 і АД1. 3. Прокатний і відпалений алюміній має високу пластичність ( $\delta = 35\%$ ) і невелику границю міцності ( $\sigma_s = 80 \text{ Мн/м}^2$ ). 4. Алюміній добре піддається обробці тиском, зварюється газовим, контактним і електродуговим способами зварювання, але погано оброблюється різанням. 5. Алюміній високої чистоти має понижenu механічну міцність, він значно м'якший і пластичніший від технічного металу. 6. Алюміній і сплави алюмінію застосовують в електротехніці, як конструкційний матеріал в машинобудуванні, авіабудуванні, будівництві і в інших галузях народного господарства.

**АНІЗОТРОПІЯ** — неоднаковість властивостей матеріалу в різних напрямках: 1. Анізотропія властивостей у виробках після деформації залежить від хімічної і фізичної неоднорідності початкових зливок чи заготовок. 2. У чистих металів (Fe, Ni) магнітна анізотропія не спостерігається. 3. Використання анізотропії деяких металічних матеріалів скорочує витрати матеріалів і покращує якість конструкцій.

**АНТИФРИКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ** — матеріали, які мають низький коефіцієнт тертя і застосовуються для виготовлення деталей машин (підшипників, втулок і ін.), що працюють в умовах тертя ковзання: 1. До металевих антифрикційних матеріалів відносяться сірі чавуни, бронзи і бабіти. 2. Як антифрикційні матеріали на основі деревини використовують натуральну і пресовану деревину, а також деревинно-шаруваті пластики. 3. Антифрикційний матеріал повинен забезпечувати рівномірну змазку поверхню що труться.

**АТОМ** — найменша частинка хімічного елементу, яка є носієм його властивостей і складається з позитивно зарядженого атомного ядра і негативно заряджених електронів: 1. Вільний атом є електрично нейтральною системою з сумарним зарядом протонів, врівноваженим сумарним зарядом електронів. 2. Маса атома практично співпадає з масою його ядра. 3. Атом підпорядковується законам квантової механіки,

а його енергія квантується, тобто приймає ряд дискретних значень, що відповідають стаціонарним станам атома. 4. В основному стані вільний атом, не пошкоджений зовнішнім впливом, може знаходитись необмежений час, в збудженому — кінцевий (обмежений) час.

**АУСТЕНИТ** — твердий розчин вуглецю і легуючих елементів в  $\gamma$ -залізі (символ А чи  $\gamma$ ); одна зі структурних складових залізвуглецевих сплавів: 1. Неперетворений аустеніт, що міститься в структурі загартованої сталі, називають залишковим аустенітом. 2. Аустеніт пластичний, але більш міцніший, ніж ферит. 3. Результатом вивчення ізотермічного перетворення аустеніту є діаграми, що відіграють важливу роль в теорії і практиці термічної обробки. 4. Хімічний склад аустеніту впливає на температурний інтервал проміжного перетворення. 5. В вуглецевих сталях і чавунах аустеніт стійкий вище температури 727 °С.

## Б

**БАБІТ** — антифрикційний сплав на основі олова чи свинцю з додатками сурьми, міді і інших елементів: 1. Бабіт відрізняється порівняно низькою температурою плавлення, високою пластичністю і хорошою припрацьовуваністю. 2. Розрізняють бабіти олов'яні, свинцево-сурм'яні і свинцеві. 3. Олов'яні бабіти застосовуються для виготовлення підшипників, експлуатованих при великих ударних навантаженнях. 4. Cu, Ni, Cd і інші елементи, які входять до складу свинцево-сурм'яних бабітів, підвищують міцність, твердість, ударну в'язкість і антикорозійні властивості цих сплавів.

**БЕЙНІТ** — структура сталі, яка складається з суміші перенасиченого вуглецем фериту і карбідів і утворюється в результаті проміжного перетворення. 1. В вуглецевих сталях бейніт утворюється під час ізотермічного гартування в результаті розпаду аустеніту в інтервалі температур проміжного перетворення 300—550 °С. 2. В деяких легованих сталях бейніт може бути отриманий при охолодженні на повітрі.

**БЕРИЛІВІ СПЛАВИ** — сплави на основі берилію: 1. З берилієвих сплавів виготовляють листи, прутки, різноманітні профілі і поковки; 2. Берилієві сплави знаходять застосування як конструкційні матеріали для літальних апаратів.



**БІЛИЙ ЧАВУН** — чавун з матово-білою поверхністю злому, в якому весь вуглець знаходиться в зв'язному стані у вигляді карбіду заліза  $\text{Fe}_3\text{C}$ : 1. Структура білих чавунів залежить від їх хімічного складу; 2. Білий чавун погано піддається обробці різанням, тому виливки з нього піддають відпалу; 3. В металургійній промисловості білий чавун застосовують для виготовлення валиків і роликів прокатних станів.

**БЛИЗЬКИЙ ПОРЯДОК** — впорядкованість (на відстані, порівняно з міжатомними) в розташуванні сусідніх атомів чи молекул в аморфних твердих тілах і рідинах: 1. Близький порядок нестійкий: він то виникає, то зникає під дією теплових коливань; 2. Наявність ближнього порядку обумовлена взаємодією між частинками; 3. Поняття ближнього порядку важливе для теорії сплавів, де воно характеризує ступінь впорядкованості сплаву; 4. В феромагнетиках і антиферомагнетиках існують ближній порядок і дальній порядок в орієнтації магнітних моментів.

**БЛОКИ МОЗАЇКИ** — ділянки монокрystalу чи зерен полікрystalу, що відрізняються непорушною кристалічною решіткою і розорієнтовані на долі градуса. 1. Блоки мозаїки є наслідком недосконалості кристалічної структури, наявності дефектів в кристалах; 2. Дроблення блоків мозаїки при різноманітних процесах веде до зміни властивостей металів; 3. Від розмірів блоків мозаїки суттєво залежать фізичні і механічні властивості матеріалу.

## В

**ВАКАНСІЇ** — дефекти кристалу, які представляють собою відсутність атома (іону) у вузлі кристалічної решітки; точкові дефекти кристалічної решітки: 1. Вакансії з'являються в кристалах при будь-якій



**БОРУВАННЯ** — насичення поверхні виробів зі сталі і деяких інших металів бором для підвищення твердості, зносостійкості і корозійної стійкості: 1. Рідинне борування проводять при температурі  $850\text{--}1000^\circ\text{C}$  в розплавах різних солей з введенням в них компонентів, що містять бор; 2. Борування підвищує втомну міцність виробів з вуглецевих і деяких низьколегованих сталей на 50 %; 3. Борування застосовують при виготовленні втулок насосів, штампів, прес-форм і ін.

**БРОНЗА** — сплав міді з різними хімічними елементами (оловом, алюмінієм, берилієм, кремнієм і ін.), за винятком цинку і нікелю: 1. Спеціальні бронзи в залежності від призначення і механічних властивостей за технологічними ознаками ділять на оброблювані тиском і ливарні; 2. Берилієва бронза відрізняється високою міцністю і пружністю; 3. З олов'яною і свинцевої бронзи виготовляють бронзові вкладки підшипників ковзання.

температурі вище абсолютного нуля в результаті теплових коливань атомів. 2. Вакансії утворюються в процесі дифузійного відпалу. 3. При гартуванні кристалів вакансії можуть об'єднуватися в пари чи





більш складні комплекси. 4. Вакансії впливають на фізичні властивості кристалів: понижують густину, викликають іонну провідність і т. д.

**ВИСОКОМІЦНИЙ ЧАВУН** — чавун, в якому графіт має кулясту форму: 1. Високі механічні властивості високоміцного чавуну забезпечуються завдяки кулястій формі графіту. 2. Високоміцний чавун нерідко піддають термічній обробці для підвищення механічних властивостей. 3. Застосування високоміцного чавуну дозволяє приблизно вдвічі знизити масу литих заготовок в порівнянні з масою тих же заготовок з сірого чавуну. 4. Високоміцний чавун отримують при модифікації сірих чавунів магнієм чи церієм.

**ВИСОКОЧАСТОТНЕ ГАРТУВАННЯ** — поверхнєве гартування сталі з застосуванням нагрівання струмами високої частоти: 1. Високочастотне гартування полягає в індукційному нагріванні поверхні виробу з подальшим охолодженням, у результаті чого суттєво підвищується твердість поверхневого шару. 2. Високочастотному гартуванню найчастіше піддають вуглецеві сталі з 0,3—0,6 % С, а також хромонікелеві і хромисті сталі.

**ВИТРИВАЛІСТЬ МАТЕРІАЛІВ** — те ж, що і втомна міцність.

**ВІДМАНШТЕТОВА СТРУКТУРА** — нерівноважна структура сталі, що складається з великих зерен перліту і орієнтованих виділень фериту чи цементиту: 1. Відманштєтова структура утворюється при

прискореному охолодженні литої чи сильно перегрітої сталі. 2. Сталі з відманштєтєвою структурою відрізняються низькою ударною в'язкістю і підвищеною крихкістю.

**ВІДПАЛ** — термічна обробка матеріалу, яка полягає в нагріванні до певної температури, витримці при цій температурі і повільному охолодженні: 1. Відпал сплавів (частіше за все залізовуглецевих) здійснюється для отримання рівноважної (стійкої) структури. 2. При відпалі I роду не відбувається фазових перетворень. 3. Відпал прокатаних сталей листів знижує їх твердість і покращує їх здатність до оброблювання різанням. 4. Графітизуючий відпал використовують при виготовленні виробів з ковкого чавуну, а також сталевих штампів і деяких видів підшипників.

**ВІДПАЛ I РОДУ** — те ж саме, що й низький відпал.

**ВІДПОЧИНОК** — зняття викривлень кристалічної решітки при нагріві деформованого металу: 1. Швидкість відпочинку максимальна в початковий момент, а потім безперервно зменшується. 2. При відпочинку твердість і міцність металу трохи знижується (на 20—30 %), а пластичність зростає. 3. Під час відпочинку деформованих металів при температурі нижче температури рекристалізації відбувається часткове відновлення фізичних і хімічних властивостей без помітних змін структури.

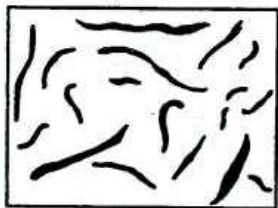
**ВІДПУСК** — нагрів загартованого сплаву нижче температури фазових перетворень: 1. Відпуск частіше за все є завершальною операцією термічної обробки. 2. Низький відпуск використовується для зняття гартувальних напружень у виробках, які повинні мати високу поверхнєву твердість. 3. Після середнього відпуску сталь має високу пружність, достатню міцність і прийнятну в'язкість; 4. Деталі піддають відпуску для отримання необхідного комплексу механічних властивостей.

**ВІДПУСКНА КРИХКІСТЬ** — зниження ударної в'язкості легованої сталі після відпуску: 1. Природа відпускну крихкості пов'язана з процесами, що відбуваються на межах зерен, субзерен. 2. Леговані низьковуглецеві сталі мають схильність до відпускну крихкості, особливо при наявності фосфору.

**ВІДПУСКНА КРИХКІСТЬ I РОДУ** — зниження ударної в'язкості легованої сталі при температурі відпуску близько 300 °С: 1. Відпускну крихкість I роду ліквідують повторним відпуском при більш високій температурі. 2. Відпускну крихкість I роду не залежить від хімічного складу сталі і швидкості охолодження після відпуску.

**ВІДПУСКНА КРИХКІСТЬ II РОДУ** — зниження ударної в'язкості легованої сталі при відпуску в інтервалі температур 400—600 °С: 1. Характерна особливість відпускну крихкості II роду в тому, що вона проявляється в результаті повільного охолодження після відпуску. 2. Схильність до відпускну крихкості II роду виникає при легуванні сталі карбідотвірними елементами (марганцем, хромом) і при наявності в ній більш ніж 0,01% Р. 3. Відпускну крихкість II роду можна ліквідувати шляхом легування сталі молібденом чи вольфрамом, а також прискореним охолодженням після відпуску.

**ВКЛЮЧЕННЯ ГРАФІТУ** — частинки графіту різної форми (пластинчасті,



пластівчасті, кулясті) в структурі залізо-вуглецевих сплавів: 1. Включення графіту це є полікристали, що вирости з одного центру. 2. Включення графіту формуються з рідкого розчину при затвердінні чавуну чи при спеціальній термічній обробці затверділого чавуну. 3. Дрібні пластівчасті включення графіту підвищують антифрикційні властивості графітізованих сталей.

**ВТОМА** — процес поступового накопичення пошкоджень і руйнування матеріалів під дією багаторазово прикладених навантажень: 1. При термічній втомі одночасно відбуваються зміцнювальні і розміцнювальні процеси. 2. Опір втоми характеризується границею витривалості. 3. При виготовленні нерознімних конструкцій дуже важливо враховувати втому зварних з'єднань. 4. Втома металу виникає в результаті впливу тривалого змінного навантаження.

**ВТОМНА МІЦНІСТЬ** — здатність матеріалів і конструкцій чинити опір дії повторним (циклічним) навантаженням (здатність чинити опір втомі): 1. Втомну міцність визначають з метою вивчення поведінки металу чи конструкції при повторно-змінних навантаженнях. 2. Границя втомної міцності — максимальне напруження, при якому метал не руйнується від втоми при заданому числі циклів. 3. Втомна міцність суттєво залежить від корозійного впливу навколишнього середовища.

**ВТОРИННА КРИСТАЛІЗАЦІЯ** — фазові перетворення в твердому стані при охолодженні сплавів: 1. На явищі вторинної кристалізації базується здатність сталі піддаватися зміцнювальній термічній обробці.



# Г

**ГАЗОВЕ ЦІАНУВАННЯ** — дифузійне-насичення поверхні сталевих деталей одночасно вуглецем і азотом в газовому середовищі: 1. Газове ціанування здійснюють в суміші світільного газу і аміаку. 2. В результаті газового ціанування підвищується поверхнева твердість, зносостійкість і витривалість сталі.

**ГАЗОВІ РАКОВИНИ** — порожнини (пустоти) у виливках чи зливках, що виникають при твердінні металу і заповненні газом, що виділяється з нього: 1. Газові раковини розміром менше 2—3 мм, розташовані рівномірно по всій виливці, утворюють пористість. 2. Утворення газових раковин обумовлене виділенням розчинених газів з металу при його застиганні, реакціями розкислення, занадто високою вологістю і недостатньою газопроникністю формувальної суміші.

**ГАРТУВАННЯ** — термічна обробка матеріалів, яка полягає в нагріві до певної температури з подальшим різким охолодженням з метою отримання нерівноважної структури: 1. Гартування приводить до отримання нестабільних (метастабільних) структур. 2. Гартування вуглецевої сталі переважно проводиться в воді, а гартування легованої сталі — в масилі. 3. Гартуванням скла називається нагрівання його вище температури склування з подальшим швидким охолодженням (в масилі чи потоком повітря). 4. Гартування чавуну в залежності від його хімічного складу, розмірів і форми виливок можна проводити в воді, масилі, на повітрі або в гарячих середовищах. 5. Гартування вуглецевої сталі приводить до отримання структури мартенситу.

**ГЕТЕРОГЕННА СТРУКТУРА** — неодно-



рідна структура, певні частинки якої розрізняються за фізичними і хімічними властивостями і відділені одні від одних поверхнею розділу: 1. Поняття гетерогенної структури включає в себе макро- і мікро-неоднорідність в розподіленні елементів структури. 2. Термічна обробка сплаву може призвести до виникнення гетерогенної структури. 3. Матеріали з гетерогенною структурою широко використовують в техніці. 4. Керуючи гетерогенною структурою, створюючи необхідну неоднорідність, можна отримувати матеріали зі заданими властивостями, наприклад, композиційні матеріали, в яких використовуються кращі властивості компонентів.

**ГІСТЕРЕЗИС** — різна реакція фізичного тіла на деякі внутрішні впливи в залежності від того, чи піддавалось це тіло раніше тим же впливам чи піддається їм вперше: 1. Причина пружного гістерезису полягає в появі у більш слабких зернах кристалу місцевої пластичної деформації. 2. Діелектричний гістерезис пов'язаний з тим, що електроізоляційні речовини володіють спонтанною поляризацією і доменною структурою. 3. В техніці велике значення мають матеріали, наприклад, хромисті сталі, що наділені великою петлею пружного гістерезису.

**ГОЛЧАСТИЙ ТРООСТИТ** — те саме, що й бейніт.



**ГОМОГЕНІЗАЦІЯ** — вирівнювання хімічного складу металу за об'ємом зливка, виливки, деталі, зерна: 1. Гомогенізація заснована на дифузії хімічних елементів в твердому стані. 2. Фасонні виливки після гомогенізації піддають повному відпалу чи нормалізації, щоб подрібнити зерно і покращити властивості металу.

**ГРАНИЦЯ ВТОМИ (ВИТРИВАЛОСТІ)** — найбільше напруження, яке може витримати метал без руйнування під дією циклічного навантаження (символ  $\sigma_{-1}$ ): 1. Деякі кольорові метали не мають явно вираженої границі витривалості і для них встановлюють умовну границю витривалості. 2. Підвищенню границі витривалості сприяють деякі види обробки (поверхневий наклеп, азотування і т. п.). 3. Границя витривалості під впливом корозії знижується.

**ГРАНИЦЯ МІЦНОСТІ** — відношення найбільшої сили, яку вірець витримує без руйнування, до площі поперечного перерізу  $\sigma_b$ : 1. Границя міцності матеріалу визначається в результаті статичного випробування на розтяг. 2. Величина границі міцності деяких металів складає 25 кг/мм<sup>2</sup> (в заліза), 20 кг/мм<sup>2</sup> (в міді), 9 кг/мм<sup>2</sup> (в алюмінію).

**ГРАНИЦЯ ПРОПОРЦІЙНОСТІ** (символ  $\sigma_{\text{пл}}$ ) — найбільше напруження, при деформації, при якому деформація ще залишається пропорційною напруженню (виконується закон Гука).

**ГРАНИЦЯ ПРУЖНОСТІ** — напруження, при якому залишкова деформація досягає деякої величини від першопочаткової довжини вірця (наприклад, до 0,002%): 1. Підвищення границі пружності досягається легуванням і мікролегуванням. 2. Границя пружності в крихких матеріалах співпадає з границею міцності, тобто з навантаженням, при якому відбувається руйнування. 3. В пластичних матеріалах границя пружності лежить значно нижче границі міцності.

**ГРАНИЦЯ ТЕКУЧОСТІ** — значення напружень, при яких в тілі вперше виникають пластичні (залишкові) деформації (символ при розтягу  $\sigma_{0.2}$ ): 1. Границя текучості не є константою матеріалу. 2. Для чистих металів вводять фізичну границю текучості, яка визначається напруженнями, при яких відбувається деформація без зростання навантаження (символ  $\sigma_T$ ).

**ГРАНИЦЯ ТРИВАЛОЇ МІЦНОСТІ** — напруження, яке викликає руйнування вірця в заданий період (наприклад, 1000 годин) при певній температурі (символ  $\sigma_{100}^T$ ).

$\sigma_{1000}^T$  кг/мм<sup>2</sup>): 1. Границя тривалої міцності характеризує опір металу руйнуванню при високих температурах. 2. Визначення границі тривалої міцності необхідне для оцінки жароміцного сплаву.

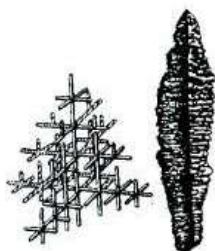
**ГРАФІТИЗАЦІЯ** — утворення (виділення) частинок графіту в структурі залізних, нікелевих і інших металевих сплавів: 1. Процес графітизації протікає тим повніше, чим більше в чавуні кремнію. 2. Марганець перешкоджає процесу графітизації. 3. Процес графітизації використовують для отримання ковкого чавуну.

**ГРАФІТИЗОВАНА СТАЛЬ** — сталь, в структурі якої присутній графіт: 1. У складі графітизованої сталі міститься підвищена кількість вуглецю і кремнію. 2. Графітизована сталь застосовується для виготовлення штамів, підшипників, колінчастих валів і інших деталей машин.

**ГУСТИНА** — фізична величина, яка чисельно дорівнює масі одиниці об'єму тіла: 1. Найбільшу густину (22500 кг/м<sup>3</sup>) має Ос. 2. Густина, як правило, зменшується з ростом температури (внаслідок теплового розширення тіл) і збільшується з підвищенням тиску. 3. В Міжнародній системі одиниць (SI) густина виражається в кг/м<sup>3</sup>.

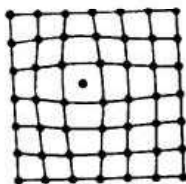
## Д

**ДЕНДРИТИ** — кристали деревоподібної (галузкової) форми: 1. Дендрити утворюються з розплавів, парів чи розчинів в процесі повільної кристалізації речовини. 2. Обов'язковою умовою росту дендритів є переохолодження середовища. 3. При сприятливих умовах кристалізації можуть утворитися великі дендрити.



**ДЕНДРИТНА ЛІКВАЦІЯ** — те ж саме, що і внутрішньокристалічна ліквідація.

**ДЕФЕКТИ КРИСТАЛІЧНОЇ РЕШІТКИ МЕТАЛІВ** — порушення правильного періодичного розміщення атомів (іонів) в вузлах кристалічної решітки металів:



1. Дефекти кристалічної решітки металів поділяються на точкові, лінійні і поверхневі;
2. До точкових дефектів кристалічної решітки металів відносять вакансії і дислоковані атоми. 3. Лінійні дефекти кристалічної решітки металів мають малі розміри

в двох вимірах, а в третьому — співрозмірні з розміром кристалу.

**ДЕФЕКТИ МЕТАЛІВ** — порушення кристалічної структури металів; відхилення від передбаченої технічними умовами якості металів за хімічним складом, структурою, щільністю, станом поверхні, механічними і іншими властивостями: 1. Деякі дефекти металів можна частково чи повністю ліквідувати на наступних стадіях виробництва. 2. Виявленням грубих дефектів металів займається дефектоскопія. 3. Одним з методів виявлення дефектів металів, що застосовують до сталевих виробів є магнітна дефектоскопія.

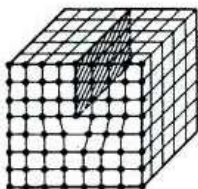
**ДЕФЕКТОСКОПІЯ** — неруйнівний контроль якості матеріалів, напівфабрикатів і виробів фізичними методами: 1. Рентгеновська дефектоскопія дозволяє помічати внутрішні дефекти — раковини, пори і т. п. 2. За допомогою ультразвукової дефектоскопії, крім визначення макро- і мікродефектів, в металевих тілах вимірюють глибину загартованого шару, визначають внутрішні напруження, густину металу і т. п. 3. Чутливість методу магнітної дефектоскопії залежить від магнітних характеристик матеріалів, режимів намагнічування виробів і ін. 4. Капілярна дефектоскопія дозволяє помітити неозброєним оком тонкі поверхневі тріщини і інші порушення щільності матеріалу, що утворюються при виготовленні і експлуатації деталей машин; 5. Дефектоскопія дає можливість підвищувати надійність і довговічність матеріалів, добиватися більшого економічного ефекту при їх виробництві і експлуатації.

**ДЕФОРМАЦІЯ** — зміна форми чи розмірів тіла під дією внутрішніх сил, при нагріванні,



охлажденні і інших впливах, що викликають зміну відносного положення частинок тіла: 1. Деформація ковзанням відбувається по площинах і напрямках з найбільшою густиною атомів. 2. Чим більша ступінь деформації, тим сильніше змінюються властивості металу. 3. Пружна деформація пов'язана зі зміною відстані між атомами під дією зовнішніх сил.

**ДИСЛОКАЦІЯ** — лінійна недосконалість будови кристалічної решітки, котра в двох вимірах має розміри порядку атомних, а в третьому — великий розмір: 1. Під



дією дотичних напружень дислокації можуть рухатись, викликаючи пластичну деформацію кристалу. 2. Позитивні і негативні дислокації, наближаючись, знищують одна одну. 3. Дислокації стають місцем концентрації атомів домішок, що зменшує викривлення решітки. 4. В напівпровідниках дислокації знижують електроопір. 5. Збільшення числа дислокацій в металевих матеріалах може приводити до підвищення їх міцності.

**ДИСПЕРСНА СТРУКТУРА** — структура речовини, що включає в себе найдрібніші частинки однієї чи кількох фаз (чим дрібніші частинки, тим вища дисперсність структури): 1. Сплави з дисперсною структурою мають підвищені значення твердості і міцності. 2. Дисперсні структури термодинамічно нестійкі, в них може спонтанно відбуватись збільшення частинок. 3. Структуроутворення і механічними властивостями дисперсної структури керують, змінюючи умови коагуляції, зростання або спікання частинок.

**ДИФУЗІЙНА МЕТАЛІЗАЦІЯ** — насичення поверхневих шарів металевих виробів іншими металами шляхом їх дифузії при високій температурі: 1. Серед методів дифузійної металізації найбільше розповсюдження отримали алітування, борування, силіціювання і хромування; 2. Дифузійну металізацію застосовують для підвищення зносостійкості, опору корозії, а також в декоративних цілях.

**ДИФУЗІЙНИЙ ВІДПАЛ** — термічна обробка сплавів з метою усунення ліквациї, що полягає у нагріві і тривалій витримці виливків чи зливків при високій температурі: 1. Дифузійний відпал ведуть при високій температурі, тривалість витримки складає 8—20 год. 2. Фасонні сталеві виливки після дифузійного відпалу піддають повному відпалу чи нормалізації для подрібнення зерна і покращення властивостей металу.

**ДИФУЗІЙНИЙ ШАР** — поверхневий шар металу, в якому відбувається зміна складу при хімічно-термічній обробці: 1. Якісний дифузійний шар отримується в результаті точного дотримання хіміко-термічної обробки. 2. Склад, глибина і властивості дифузійного шару залежать від температури і тривалості процесу. 3. Дифузійний шар оберігає поверхню металу від корозії, підвищує опір зношенню і границю витримки.

**ДИФУЗІЯ** — теплове переміщення іонів, атомів, молекул речовини в напрямку вирівнювання їх концентрації; в кристалічній речовині — переміщення атомів на віддалі, що перевищують міжатомні: 1. В основі процесу дифузії в кристалах лежить атомний механізм, при якому кожен атом здійснює ряд стрибків між різними положеннями в решітці. 2. В металах дифузія переважно здійснюється за вакансійним механізмом. 3. Кількісно процес дифузії характеризується коефіцієнтом



дифузії. 4. Явище дифузії в ізотермічних умовах широко використовується в численних технологічних процесах — азотуванні, цементації і ін.

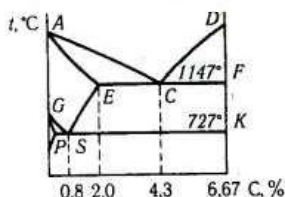
**ДІАГРАМА СТАНУ (СПЛАВІВ)** — графічна залежність між фазовим складом сплавів, температурою і концентрацією компонентів при кристалізації і подальшому охолодженні:



1. Діаграма стану показує фазовий склад сплавів в рівноважних умовах. 2. Вигляд діаграми стану подвійних сплавів визначається характером взаємодії компонентів в твердому стані. 3. За допомогою діаграми стану визначають температуру плавлення сплавів, вибирають температури обробки тиском, встановлюють режими термічної обробки сплавів. 4. Діаграми стану використовують при створенні сплавів з заданими властивостями.

**ДІАГРАМА СТАНУ ЗАЛІЗО-ВУГЛЕЦЬ** — діаграма, яка описує фазовий рівноважний стан залізобуглецевих сплавів в залежності від складу і температури. 1. За діаграмою стану залізо-вуглець роблять висновки про фазовий склад і структуру повільно охолоджених сплавів, а також про можливість зміни мікроструктури в результаті

термічної обробки. 2. Діаграму стану залізо-вуглець використовують при розробці режимів термообробки сталі і чавунів.



**ДОВЕТЕКТОЇДНА СТАЛЬ** — вуглецева чи низьколегована сталь, що містить менш ніж 0,8% вуглецю: 1. Довефектоїдні сталі в рівноважному стані (після відпалу) мають структуру фериту і перліту. 2. Довефектоїдна сталь за своїм значенням є конструкційною, оскільки з неї виготовляють різноманітні деталі машин, конструкцій і т. д. 3. Прикладом довефектоїдних сталей можуть бути пружинні сталі, котрі містять 0,5—0,7% вуглецю.

**ДУРАЛЮМІН** — сплав алюмінію з 2,2—5,2% Cu, 0,2—2,7% Mg і 0,2—1,0% Mn: 1. Підвищення міцності дуралюмінію досягається шляхом термічної обробки, що складається з гартування і старіння. 2. Дуралюмін є широко застосовуваним матеріалом. 3. Дуралюміни випускають у вигляді листів, труб, пресованих і катаних профілів. 4. Для захисту від корозії дуралюміні у вигляді листів піддають плакуванню, а у вигляді труб — анодній поляризації; 5. Дуралюмін застосовується в транспортному і авіаційному машинобудуванні.

## Е

**ЕВТЕКТОЇДНА СТАЛЬ** — сталь, рівноважна структура якої складається з перліту: 1. Евтектоїдна сталь частіше за все застосовується для виготовлення різного

інструменту: ріжучого, ударного, штампового. 2. У вуглецевій евтектоїдній сталі вміст вуглецю складає 0,8%.

**ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ** — властивість матеріалу проводити електричний струм під дією незмінного в часі електричного поля; 1. Електропровідність дорівнює добутку заряду носіїв струму на їх концентрацію і рухливість. 2. В діелектриках спостерігається іонна, електронна і змішана електропровідність.

## Ж

**ЖАРОМІЦНА СТАЛЬ** — сталь, здатна чинити опір деформації і руйнуванню при високих температурах: 1. Кращими жароміцними сталями є сталі аустенітного класу, леговані хромом і нікелем. 2. З жароміцних сталей виготовляють деталі, що працюють при підвищених температурах: клапани двигунів внутрішнього згорання, лопатки турбін, деталі кріплення і т. д.

**ЖАРОМІЦНІСТЬ** — здатність матеріалів (переважно металевих сплавів) при високих температурах витримувати без руйнування механічні навантаження: 1. Підвищення жароміцності може бути досягнуте застосуванням сплавів на основі металів з високою температурою плавлення. 2. Висока жароміцність сплаву забезпечується стабільною структурою, уповільненням дифузійних процесів і рекристалізації. 3. Жароміцність сплаву характеризується опором повзучості.

**ЕЛЕКТРОХІМІЧНА КОРОЗІЯ** — руйнування металів у водних розчинах електролітів: 1. Електрохімічна корозія визначається тими ж процесами, що й робота гальванічних елементів. 2. Розповсюдженим типом електрохімічної корозії є ржавління деталей і конструкцій у вологому повітрі, трубопроводів в землі і т. п.

**ЖАРОСТІЙКА СТАЛЬ** — сталь, стійка проти окислення при високій температурі. Вироби з жаростійкої сталі працюють при високих температурах в ненавантаженому або слабонавантаженому стані.

**ЖАРОСТІЙКІСТЬ** — здатність металів і сплавів чинити опір окисленню при високих температурах: 1. Жаростійкість сплавів в окисленому середовищі обумовлюється властивостями утвореної на поверхні окалини, яка тормозить дифузію газів всередину сплаву і тим самим заважає розвитку корозії. 2. Для підвищення жароміцності сплавів їх додатково легують алюмінієм і кремнієм. 3. Високою жаростійкістю володіють жароміцні сталі, які застосовуються при виготовленні клапанів двигунів внутрішнього згорання. 4. Жаростійкість поряд з жароміцністю є основним критерієм придатності матеріалу для експлуатації при високих температурах.

## З

**ЗАГАРТОВУВАНІСТЬ** — здатність сталі набувати в результаті гартування максимальної твердості: 1. Загартовуваність залежить головним чином від вмісту вуглецю в сталі. 2. Загартовуваність легованої сталі залежить від повноти розчинення в аустеніті карбідів, нітридів і деяких інших сполук.

**ЗАЕВТЕКТОЇДНА СТАЛЬ** — вуглецева і легована сталь, що містить більше 0,8% С: 1. Заевтектоїдна сталь має високу твердість і низьку пластичність. 2. У рівноважному стані (після відпаду) структура заевтектоїдної сталі складається з перліту і цементиту.

**ЗАЛІЗО** — блискучий сріблясто-білий метал з температурою плавлення 1539 °C і густиною 7874 кг/м<sup>3</sup> (символ Fe): 1. Залізо добре розчиняється в розбавлених кислотах і практично не розчиняється в лугах; 2. На долю сплавів заліза приходить приблизно 95% всієї металургійної продукції.

**ЗАРОДКИ КРИСТАЛІВ** — групи атомів або нерозчинні в розплаві частинки, навколо яких при переохолодженні виростають кристали: 1. При охолодженні сплаву процес кристалізації починається з появи зародків кристалів. 2. Число зародків кристалів (або центрів кристалізації) залежить від ступеня переохолодження розплаву нижче температури кристалізації.

**ЗЕМЛЯНИ РАКОВИНИ** — порожнини (пустоти) у виливках, які виникають через місцеве руйнування форми при збиранні, недостатню міцність формувальної і стрижневої сумішей, а також неправильної конструкції ливникової системи. Земляним раковинам запобігають ретельним виготовленням і збиранням форми, а також застосуванням сумішей високої якості.

**ЗЕРНИСТІСТЬ** — характеристика розміру і однорідності абразивних зерен: 1. Зернистість шліфувальних кругів характеризується розміром зерен і позначається відповідним номером. 2. За зернистістю абразивний матеріал поділяється на шліфзерно, шліфпорошки, мікропорошки.

**ЗЕРНО (КРИСТАЛІЧНЕ)** — кристал певної форми в металічному матеріалі: 1. Спадкове зерно свідчить про схильність зерен аустеніту до росту при нагріванні сталі. 2. Дійсне зерно в сталі характеризується його фактичним розміром після термічної обробки. 3. Розмір зерна аустеніту впливає на прогартовуваність сталі.

**ЗЛОМ** — поверхня, яка утворюється після руйнування взірця чи виробу: 1. В'язкі волокнисті зломи свідчать про значну пластичну деформацію металу перед руйнуванням. 2. Крихкий злом часто дозволяє виявити величину зерна аустеніту при останньому нагріві сталі. 3. Аналіз злому відіграє важливу роль при встановленні причин поломок деталей.

**ЗНЕВУГЛЕЦЮВАННЯ** — зменшення вмісту вуглецю на поверхні сталевих деталей при нагріві в окислювальному або водневому середовищі: 1. Зневуглицювання може бути ліквідовано при нагріванні в печах з захисною атмосферою або в вакуумі. 2. Сталь охороняють від зневуглицювання відпалом в захисному середовищі сухого конвертованого аміаку. 3. При зневуглицюванні сталі в структурі поверхневого шару деталей збільшується кількість фериту, що викликає пониження твердості і міцності.

**ЗНОСОСТІЙКІСТЬ** — опір матеріалів, деталей машин і інших поверхонь тертя зношенню: 1. Графітізована сталь відрізняється високою зносостійкістю в умовах стирання при великих тисках. 2. Для збільшення зносостійкості широко застосовують різні види поверхневого зміцнення. 3. Зносостійкість сталі залежить від її хімічного складу, структури, термічної обробки і твердості структурних складових. 4. Присутність графіту в значній мірі підвищує зносостійкість чавуну.

**ЗОНАЛЬНА ЛІКВАЦІЯ** — хімічна неоднорідність по об'єму зливка, виливки, деталі чи зварного шва: 1. Зональна ліквіація по перерізу зливка буває прямою і рідше зворотною; 2. Зональна ліквіація чітко спостерігається в сплавах, схильних до утворення зони транскристалізації. 3. Для послаблення зональної ліквіації застосовують високі швидкості охолодження, обмежують розміри зливків.



## I

**ІЗОТЕРМІЧНЕ ГАРТУВАННЯ** — гартування, яке полягає в різкому охолодженні сталі до температури 300—400 °C і подальшій тривалій витримці при цій температурі: 1. При ізоtermічному гартуванні сталь нагрівають до температури аустенітизації, швидко охолоджують до температури, трохи більшої за температуру початку мартенситного перетворення, витримують при цій температурі до повного розпаду аустеніту з будь-якою швидкістю. 2. Сталь при ізоtermічному гартуванні охолоджують переважно в розплавлених солях і лугах, рідше — в розплавленому свинці. 3. Застосування ізоtermічного гартування підвищує конструкційну міцність багатьох середньовуглецевих сталей, знижує жолоблення, сприяє ліквідації гартувальних тріщин, отриманню світлої поверхні; 4. Ізоtermічне гартування, на відміну від інших способів гартування сталі, приводить до отримання структури бейніту (голчастого трооститу).

**ІЗОТЕРМІЧНИЙ ВІДПАЛ** — відпал металів (сталі і чавуну), який базується на нагріванні металу до структури аустеніту, швидкому охолодженні до 600—700 °C, витримці до закінчення розпаду аустеніту, а згодом охолодженні на повітрі: 1. Ізоtermічний відпал здійснюють в основному для скорочення тривалості процесу відпалу. 2. Ізоtermічний відпал особливо ефективний для високо- і складнолегованих сталей. 3. Щоб встановити, коли ізоtermічний відпал краще відпалу з неперервним охолодженням, аналізують діаграму ізоtermічного перетворення аустеніту з урахуванням можливостей termічного устаткування. 4. Ізоtermічний відпал проводять в печах з системою автоматичного регулювання температури.

**ІЗОТРОПІЯ** — однаковість фізичних і механічних властивостей тіла (середовища)

у всіх напрямках: 1. Ізотропія обумовлюється однаковим розташуванням і однаковою щільністю упаковки атомів у всіх площинах і напрямках; 2. За ізотропією окремих властивостей не можна робити висновки про ізотропію всіх властивостей матеріалу; 3. Ізотропія конструкційних матеріалів у багатьох випадках є бажаною, а часто і обов'язковою властивістю, наприклад, коли напружений стан матеріалу в умовах експлуатації невідомий чи змінюється з плином часу.

**ІНВАРНІ СПЛАВИ** — залізонікелеві сплави з низьким температурним коефіцієнтом лінійного розширення: 1. Інварні сплави з високим вмістом хрому мають хороші антикорозійні властивості. 2. Фізичні і механічні властивості інварних сплавів можна змінювати шляхом наклепу. 3. Інварні сплави використовують при виготовленні точних приладів і деталей до них.

**ІНСТРУМЕНТАЛЬНА СТАЛЬ** — вуглецева і легована сталь з високою твердістю, міцністю, зносостійкістю, яка використовується для виготовлення різального, штампового і вимірювального інструменту: 1. Переважно інструментальні сталі за насиченістю вуглецем є заевтектоїдними, тобто містять більш ніж 0,8% C, але в інструментальній сталі може бути і менше ніж 0,8% C, наприклад, в сталі для гарячих штамів. 2. Termічна обробка інструментальної сталі для різального і вимірювального інструменту повинна забезпечити структуру мартенситу і карбідів. 3. Інструментальні сталі, леговані хромом і марганцем, мають більш високу загартовуваність і прогартовуваність, ніж вуглецеві.

**ІНТЕРКРИСТАЛІТНА КОРОЗІЯ** — те ж саме, що й міжкристалітна корозія.

## К

**КАРБІДНА ЛІКВАЦІЯ** — неоднорідність розподілення карбідів у високовуглецевій легованій сталі: 1. Карбідна ліквіація погіршує властивості швидкокорізальних сталей. 2. Для усунення карбідної ліквіації іноді використовують повторне кування сталі.

**КАРБІДИ** — сполуки вуглецю з металами і деякими неметалами: 1. Карбіди отримують нагрівом окислів металів чи металокідів з вуглецем. 2. Cr, W і інші елементи, що вводяться в сталі як легуючі присадки, утворюють в них карбіди, причому деякі з цих елементів утворюють кілька карбідів. 3. За характером хімічного зв'язку і фізико-хімічними властивостями розрізняють карбіди солеподібні, ковалентні і метало-подібні. 4. У сильно деформованій швидкокорізальній сталі евтектичні і вторинні карбіди розподілені рівномірно в основній матриці. 5. Послідовність розчинення карбідів в аустеніті визначається їх стійкістю. 6. Карбіди застосовуються як матеріал для чохлів металевих термопар занурення, нагрівачів високотемпературних електричних печей, випаровувачів, катодів потужних генераторних пристроїв і т. д.

**КАРБЮРИЗАТОР** — середовище, що містить вуглець (тверде, рідке, газоподібне), здатне при певних умовах насичувати вуглецем сталеві деталі: 1. Як твердий карбюратор в заводських умовах використовують суміш деревного вугілля з вуглекислими солями. 2. При газовій цементації деталі розміщують в спеціальні камери-муфелі, в які вводиться газовий карбюратор. 3. Вуглекислі солі, що входять до складу карбюратора, прискорюють процес дифузії. 4. Як газовий карбюратор частіше за все використовують спеціально

приготовлений газ, що містить в певному відношенні граничні вуглеводи і деяку кількість окису вуглецю.

**КОАГУЛЯЦІЯ** — укрупнення частинок в дисперсних системах: 1. Коагуляція наближає структуру сплаву до рівноважної. 2. Коагуляція розповсюджена в природних і застосовуваних в техніці дисперсних системах. 3. Швидкість коагуляції визначається добутком 2-х величин, одна з яких характеризує частоту «співударів» частинок, а інша — можливість їх злипання при зближенні. 4. Коагуляція використовується при виготовленні багатьох неорганічних матеріалів, в процесах фарбування тканин і шкіри, при очищенні води, проклеюванні паперу і т. д.

**КОБАЛЬТОВІ СПЛАВИ** — сплави на основі кобальту з домішками хрому, нікелю, молібдену, вольфраму і інших елементів: 1. Кобальтові сплави відрізняються малим коефіцієнтом термічного розширення  $(15,9—16,5) \cdot 10^{-6}$  град.<sup>-1</sup> в інтервалі температур 20—870 °С, жаростійкістю, високою корозійною стійкістю і особливими магнітними властивостями. 2. Найбільше застосування знайшли кобальтові сплави з важкими металами — залізом, хромом, нікелем, молібденом, вольфрамом і ін. 3. Кобальтові сплави, що містять до 50 % Со, застосовують для виготовлення деталей, які експлуатують при високій температурі, наприклад, лопаток турбореактивних двигунів.

**КОВКИЙ ЧАВУН** — сірий чавун підвищеної пластичності, в якому графіт має форму пластівців: 1. Металевою основою ковкого чавуну можуть бути ферит (феритний ковкий чавун), перліт (перлітний



ковкий чавун) чи ферито-перліт (ферито-перлітний ковкий чавун). 2. Ковкий чавун може оброблятися різанням. 3. З ковкого чавуну виготовляють колінчасті і розподільні вали, поршні дизельних двигунів, коромисла клапанів, деталі зчеплення і інші вироби.

**КОГЕРЕНТНІСТЬ** — узгодженість (близькість орієнтування) кристалічних решіток на межі двох фаз: 1. Якщо між кристалами двох фаз є когерентність, то обидві фази називаються когерентними. 2. При наявності когерентності кристалів ріст нової фази відбувається з дуже великою швидкістю; 3. На межі фаз мартенсит—аустеніт при зростанні мартенситної пластини виникають напруження, які швидко руйнують когерентність кристалічних решіток.

**КОЕРЦИТИВНА СИЛА** — напруженість магнітного поля, необхідна для того, щоб звести залишкову намагніченість в феромагнетиках до нуля (символ  $H_c$ , одиниця виміру — А/м): 1. Чим більша величина коерцитивної сили, тим більша магнітна енергія зразка. 2. Низьку коерцитивну силу повинні мають ферити, призначені для перемикання пристроїв. 3. Практично в литих магнітних сплавах отримана коерцитивна сила порядку 145 кА/м. 4. Коерцитивна сила в значній мірі залежить від структури матеріалу і розмірів зрізця; 5. Для зменшення коерцитивної сили заліза звичайно використовують відпал у середовищі водню при температурі близькій до 1000 °С.

**КОЕФІЦІЄНТ ДИФУЗІЇ** — кількість речовини, що дифундує (проходить) через одиницю площі (1 см<sup>2</sup>) за одиницю часу (1 с) при перепаді концентрації, що дорівнює одиниці: 1. Температурна залежність коефіцієнту дифузії підпорядковується експоненціальному закону. 2. Для визначення коефіцієнту дифузії необхідно мати значення величин передекспоненціального

множника і енергії активації; 3. Коефіцієнт дифузії і характер його температурної залежності визначаються механізмом елементарного переміщення дифундувальних атомів.

**КОНСТРУКЦІЙНА СТАЛЬ** — вуглецева або легована сталь, призначена для виготовлення деталей машин і будівельних конструкцій: 1. Конструкційна сталь є доевтектоїдною, тобто містить менше ніж 0,8% С. 2. Більшість легувальних елементів збільшують прогартуваність і підвищують механічні властивості конструкційної сталі. 3. Назва конструкційної сталі може відображати її призначення (котельна, клапанна, ресорно-пружинна, суднобудівна і ін.).

**КОРОЗІЙНОСТІЙКА СТАЛЬ** — те ж саме, що й нержавіюча сталь.

**КОРОЗІЯ** — процес руйнування металів і сплавів під дією навколишнього середовища: 1. За механізмом корозійного процесу розрізняють хімічну і електрохімічну корозію. 2. Стійкість до корозії високолегованої сталі залежить не тільки від хімічного складу сталі, але й від її мікроструктури. 3. Корозія під напруженням виникає при умові одночасної взаємодії певних агресивних середовищ і статичних напружень розтягу. 4. Місцева корозія буває у вигляді плям (наприклад, корозія латуні в морській воді) чи у вигляді точок (наприклад, корозія аустенітної хромо-нікелевої нержавіючої сталі в морській воді).

**КРИСТАЛИ** — тверді тіла зі строго закономірним розташуванням атомів, іонів чи молекул, що утворюють кристалічну решітку: 1. В залежності від типу зв'язку, що діє в кристалічній решітці, розрізняють кристали іонні, атомні, молекулярні і металеві. 2. Кристали є анізотропними тілами. 3. Специфічність структури

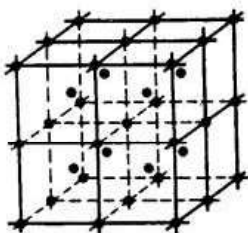


кристалів обумовлює особливості їх механічних, електричних, магнітних і інших властивостей. 4. Кристали утворюються з газової фази, розплавів, перенасичених розчинів, а також внаслідок розпаду твердих розчинів і поліморфних перетворень.

**КРИСТАЛІЗАЦІЯ** — перехід з рідкого чи газоподібного стану в твердий з утворенням кристалічної структури: 1. Кристалізація починається при охолодженні рідкого сплаву нижче рівноважної температури і супроводжується виділенням прихованої теплоти. 2. Розмір зерен при кристалізації сплавів залежить від співвідношення кількості центрів кристалізації і швидкості їх зростання. 3. В реальних умовах на процес кристалізації впливають домішки.

**КРИСТАЛІТИ** — те ж саме, що й зерно (кристалічне).

**КРИСТАЛІЧНА РЕШІТКА** — геометрично правильне закономірне розташування атомів (іонів, молекул) твердої речовини в просторі: 1. Розміри кристалічної решітки



характеризуються її параметрами. 2. Кристалічна решітка деяких металів може змінюватися при зміні температури. 3. Більшість технічно важливих металів утворюють складну кристалічну решітку: кубічну об'ємноцентровану, чи кубічну гранецентровану, чи гексагональну щільноупаковану.

**КРИТИЧНА СТУПІНЬ ДЕФОРМАЦІЇ** — величина (ступінь) пластичної деформації металу чи сплаву, при якій після рекристалізаційного відпалу утворюються зерна максимального розміру: 1. Критична ступінь деформації металу залежить від його фізичної природи. 2. Критична ступінь деформації невелика і знаходиться в межах 3—8 %. 3. Якщо після деформації проводиться рекристалізаційний відпал, то треба враховувати величину критичного ступеня деформації.

**КРИТИЧНА ТОЧКА** — температура, при якій в металі чи сплаві відбувається фазове перетворення: 1. Для кожного сплаву експериментально будують криві охолодження і визначають по них критичні точки; 2. При побудові діаграм стану отримані значення критичних точок сплавів відкладають на вертикальних лініях, які відповідають хімічному складу цих сплавів. 3. При нагріванні залізо-вуглецевих сплавів перетворення перліту в аустеніт починається в критичній точці  $A_1$ .

**КРИТИЧНА ШВИДКІСТЬ ГАРТУВАННЯ** — мінімальна швидкість сталі, при якій не відбувається дифузійного розпаду аустеніту (символ  $V_{кр}$ ): 1. Критична швидкість гартування зменшується зі збільшенням вмісту вуглецю і легувальних елементів в сталі; 2. Критичну швидкість гартування підвищують введенням кобальту. 3. При гартуванні сталь потрібно охолоджувати зі швидкістю більшою, ніж критична швидкість гартування.

**КРИТИЧНА ШВИДКІСТЬ ОХОЛОДЖЕННЯ** — те ж саме, що й критична швидкість гартування.

**КРИТИЧНИЙ ДІАМЕТР** — максимальний діаметр сталюого циліндру, який прогартується наскрізь (повністю) в даному охолоджувальному середовищі

(символ  $D_c$ ): 1. Критичний діаметр необхідно враховувати при виборі сталі для виробу. 2. Знаючи ідеальний критичний діаметр, можна визначити реальний критичний діаметр для матеріалу при гартуванні у воді, в маслі і в повітрі, користуючись спеціальною номограмою.

**КРИХКІСТЬ** — властивість твердих матеріалів руйнуватися при механічних впливах без помітної пластичної деформації: 1. Велику крихкість має сталь, загартована на мартенсит. 2. Крихкість залежить від структурного стану матеріалу і умов випробування: чим вища концентрація напружень, тим сильніше проявляється крихкість матеріалу.

## Л

**ЛАТУНЬ** — сплав Cu з Zn (до 45%), часто з домішками Al, Fe, Mn, Ni, Pb і інших елементів (в сумі до 10%): 1. Ливарна латунь має хорошу рідкотекучість і малу схильність до ліквачії; 2. Лиття латуней здійснюють в землю, в кокіл чи під тиском; 3. За способом обробки латуні поділяють на деформовані латуні, що піддаються обробці тиском, і ливарні латуні, що відрізняються хорошими ливарними властивостями; 4. Латунь застосовують в машинобудуванні, в автомобільній і годинниковій промисловості, в приладобудуванні і інших галузях промисловості.

**ЛЕГОВАНА СТАЛЬ** — сталь, у склад якої спеціально вводять легуючі елементи для покращення експлуатаційних і технологічних властивостей: 1. В залежності від легуючих елементів розрізняють марганцеву, кремністу, хромисту, нікелеву і інші леговані сталі. 2. Конструкційна легована сталь застосовується в машинобудуванні для виробництва виробів, які витримують при експлуатації статичні і динамічні навантаження. 3. Леговану сталь з особливими фізичними і хімічними властивостями використовують для виготовлення клапанів двигунів внутрішнього згорання, лопаток парових і газових турбін, хімічної апаратури і інших виробів.

**ЛЕГОВАНИЙ ЧАВУН** — чавун, у склад якого спеціально вводять легуючі елементи, що надають йому підвищеної міцності,

зносостійкості, жаротривкості і інших властивостей: 1. В залежності від вмісту легуючих елементів леговані чавуни поділяються на мікролеговані, низьколеговані, середньолеговані і високолеговані. 2. Підбиранням відповідних легуючих елементів отримують леговані чавуни з різними властивостями; 3. З корозійностійких легованих чавунів виготовляють деталі двигунів і вузлів, які експлуатуються в нагрітих кислотах, вологому парі і морській воді.

**ЛЕГУВАННЯ** — введення в склад металевих сплавів спеціальних елементів для зміни будови сплавів, надання їм певних фізичних, хімічних чи механічних властивостей: 1. Крім сталі, легування застосовують для сплавів на основі міді, алюмінію, хрому, титану, тугоплавких металів і ін. 2. Під впливом легування зменшується окрихчування сплаву неметалевими фазами. 3. Легування, при якому елементи вводять в кількості 0,1% називається мікролегуванням. 4. Легування впливає на кінетику фазових перетворень в сталі.

**ЛЕГУЮЧІ ЕЛЕМЕНТИ** — хімічні елементи, переважно метали, що вводяться в склад сплавів для надання їм певних властивостей: 1. Основними легуючими елементами в конструкційних сталях є Cr, Mn, Si, Ni, а також в невеликій кількості Mo, W, V і Ti. 2. Легуючі елементи



переважно розчиняються в основних фазах залізовуглецевих сплавів чи утворюють спеціальні карбіди. 3. Більшість застосовуваних легуючих елементів може утворювати інтерметалеві сполуки. 4. Вплив легуючих елементів на кінетику ізотермічного розпаду аустеніту дуже великий.

**ЛЕДЕБУРИТ** — евтектична механічна суміш аустеніту і цементиту, яка утворюється при температурі нижче  $1147^{\circ}\text{C}$ ; при температурі нижче  $727^{\circ}\text{C}$  — суміш перліту і цементиту; одна з основних структурних складових залізовуглецевих сплавів, головним чином чавунів: 1. В чистих залізовуглецевих сплавах ледебурит утворюється лише при вмісті вуглецю більш ніж 2,14 %. 2. Наявність крихкого і твердого ледебуриту в залізовуглецевому сплаві виключає можливість пластичної деформації і утруднює його механічну обробку; 3. Сталі ледебуритного класу містять відносно невелику кількість ледебуриту.

**ЛИТТЯ** — отримання виробів у вигляді виливок з різних матеріалів: 1. Чавунне лиття отримало розповсюдження в будівельній техніці і в металургійній промисловості. 2. Лиття в піщані форми застосовується для виготовлення виливок найрізноманітнішої форми, габаритів і маси з різних сплавів. 3. Будь-який метод лиття має свої переваги і недоліки. 4. Литтям виготовляють маховики, блоки циліндрів, колінчасті і кулачкові вали, станини верстатів, поршні і т. п.

**ЛІКВАЦІЯ** — неоднорідність хімічного складу за об'ємом зливка, виливки, деталі, зерна, яка виникає при кристалізації металу:

1. Найбільша ліквіація спостерігається у сплавів з великими інтервалами температур початку і кінця кристалізації. 2. Внаслідок ліквіації в металі виникає ряд дефектів: гарячі тріщини в зливках, виливках і зварних швах, анізотропія механічних властивостей і ін. 3. Сірка і фосфор в сталях мають максимальну схильність до ліквіації. 4. Щоб попередити ліквіацію за густиною, сплав охолоджують швидко. 5. Ліквіацію вивчають за допомогою якісних і кількісних методів фізико-хімічного аналізу.

**ЛІНІЯ ЛІКВІДУС** — лінія на діаграмі стану, яка показує температуру початку кристалізації сплавів: 1. Між лінією ліквідус і лінією солідус в рівновазі знаходяться дві фази. 2. Склад рідкої фази при кристалізації змінюється по лінії ліквідус. 3. Лінія ліквідус представляє собою геометричне місце точок ліквідус.

**ЛІНІЯ СОЛІДУС** — лінія на діаграмі стану, яка показує температуру кінця кристалізації сплавів: 1. Для визначення складу і кількості фаз, що знаходяться в рівновазі при будь-якій температурі між лінією ліквідус і лінією солідус, треба скористатися правилом відрізків (правилом важеля). 2. Проекція точки перетину конноди з лінією солідус вказує склад твердої фази. 3. Лінія солідус представляє собою геометричне місце точок солідус.

## М

**МАГНІЙ** — блискучий сріблясто-білий легкий метал зі густиною  $1739\text{ кг/м}^3$  і температурою плавлення  $651^{\circ}\text{C}$  (символ  $\text{Mg}$ ): 1. Первинний магній, отриманий електролізом чи термічними способами, піддають рафінуванню.

2. Обробку магнію тиском проводять при підвищеній температурі. 3. Магній має малу міцність і пластичність. 4. При нагріванні магній активно окислюється і легко займається, особливо у вигляді порошку або дрібної стружки.



**МАГНІТНА ПРОНИКНІСТЬ** — фізична величина, яка кількісно характеризує здатність матеріалу намагнічуватися в магнітному полі (символ  $\mu$ ): 1. Відносна магнітна проникність феромагнітних металів досягає десятків і сотень тисяч одиниць, а для інших металів вона близька до одиниці. 2. Відносна магнітна проникність пов'язана з магнітною сприйнятливістю співвідношенням  $\mu = k_\mu + 1$ . 3. Магнітна проникність залежить від швидкості зміни напруженості магнітного поля.

**МАГНІТНА СПРИЙНЯТЛИВІСТЬ** — здатність матеріалу намагнічуватися в магнітному полі (символ  $k_\mu$ ): 1. Вивчення магнітної сприйнятливості неорганічних матеріалів дає важливу інформацію про їх структуру, дозволяє будувати діаграми стану сплавів і т. п. 2. Магнітна сприйнятливість залежить від напруженості магнітного поля. 3. При дуже високій напруженості магнітного поля диференціальна магнітна сприйнятливість досягає величини, яка властива парамагнітним матеріалам.

**МАГНІТОМ'ЯКІ МАТЕРІАЛИ** — матеріали, які легко намагнічуються в магнітному полі і легко розмагнічуються поза ним: 1. Для магнітом'яких матеріалів характерні низька коерцитивна сила і малі втрати на гістерезис. 2. До магнітом'яких матеріалів відносяться пермалой, пермендюр, залізо армо, карбонільне і електролітичне залізо, електротехнічна сталь і ін. 3. Магнітом'які матеріали піддають термічній обробці в вакуумі чи в середовищі водню.

**МАГНІОСТРИКЦІЯ** — зміна розмірів і форми тіла при його намагнічуванні: 1. Об'ємна магніострикція в деяких сплавах досягає значної величини. 2. Експериментально магніострикція найбільше вивчалась в полікристалічних феромагнетиках. 3. Для

заліза поздовжня магніострикція в слабкому магнітному полі має позитивний знак.

**МАГНІТОТВЕРДІ МАТЕРІАЛИ** — матеріали, які важко намагнічуються в магнітному полі і важко розмагнічуються поза ним: 1. З магнітотвердих матеріалів виготовляють постійні магніти, що використовуються в мікродвигунах і у вимірних приладах. 2. Напівфабрикати з деформованих магнітотвердих матеріалів отримують у вигляді дроту, стрічок, смуг чи прутків. 3. Іноді після спікання магнітотверді матеріали піддають пластичному деформуванню з подальшою обробкою різанням чи штампуванням.

**МАГНІЄВІ СПЛАВИ** — ливарні і оброблювані тиском сплави на основі магнію з додатками алюмінію, цинку, марганцю, цирконію, рідкоземельних і інших елементів: 1. Магнієві сплави за призначенням поділяються на ливарні і оброблювані тиском. 2. Магнієві сплави піддають литтю, обробці тиском, зварюванню і механічній обробці різанням. 3. Добра оброблюваність різанням є однією з переваг магнієвих сплавів. 4. Властивості магнієвих сплавів покращують модифікуванням. 5. Широке застосування магнієві сплави знаходять в електротехнічній промисловості, в авіабудуванні і суднобудуванні.

**МАКРОСКОПІЧНИЙ АНАЛІЗ** — вивчення будови металів і сплавів неозброєним оком чи при невеликому збільшенні (не більше 30 разів): 1. При макроскопічному аналізі можна встановити якість металу, спосіб виготовлення деталей і причину руйнування її при експлуатації. 2. Макроскопічний аналіз дозволяє виявити неметалічні включення, пористість, усадкові раковини і інші дефекти. 3. Макроскопічний аналіз проводиться трьома способами: оглядом поверхні деталі (металу), вивченням злому і вивченням макрошліфів.

**МАКРОСТРУКТУРА** — будова металів і сплавів, яку видно неозброєним оком чи при невеликих збільшеннях (не більше 30 разів): 1. В практиці термічної обробки сталі розповсюджений аналіз макроструктури злomu. 2. Для виявлення макроструктури макрошліф травлять концентрованими розчинами кислот в холодному або гарячому вигляді. 3. Дослідження макроструктури є цінним і необхідним методом вивчення металевих матеріалів.

**МАКРОШЛІФ** — металевий зразок з плоскою шліфованою поверхнею, призначений для виявлення макроструктури: 1. Макрошліфи зі сталевого і чавунного лиття можуть бути використані для виявлення ліквіації сірки і фосфору. 2. Макрошліф представляє собою пластину товщиною 15—30 мм, яку вирізають з виливки, поковки чи деталі і піддають шліфуванню. 3. Аналіз макрошліфа допомагає виявити грубі дефекти структури.

**МАРТЕНІВСЬКА СТАЛЬ** — сталь, що виплавляється в мартенівських печах: 1. Мартенівська сталь більш високої якості, ніж конвертерна, тому вона йде на виготовлення більш відповідальніших виробів. 2. При виробництві мартенівської сталі використовують не тільки рідкий чавун, але також і металевий лом.

**МАРТЕНСИТ** — пересичений твердий розчин вуглецю в  $\alpha$ -залізі; одна зі структурних складових в залізобуглецевих сплавах: 1. Твердість мартенситу залежить від вмісту в ньому вуглецю. 2. При вмісті в сталі 0,7 % С твердість мартенситу досягає максимального значення. 3. Викривлення кристалічної решітки мартенситу сприяють високій міцності і твердості загартованої сталі, а також його низькій пластичності. 4. Утворення мартенситу супроводжується збільшенням об'єму сталі.

**МАРТЕНСИТНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ** — бездифузійне фазове перетворення аустеніту в мартенсит у залізобуглецевих сплавах, яке відбувається при різкому охолодженні з температури вище 727 °С: 1. У результаті мартенситного перетворення в сталі і чавуні утворюється нерівноважна структура. 2. Температурний інтервал мартенситного перетворення залежить від хімічного складу сталі. 3. Вуглець інтенсивно знижує температуру початку і кінця мартенситного перетворення.

**МІДНІ СПЛАВИ** — сплави на основі міді: 1. Мідні сплави отримують сплавленням міді з різними елементами або іншими сплавами; 2. Стійкість мідних сплавів проти корозії залежить від природи легуючого елементу і навколишнього середовища. 3. Більшість мідних сплавів не піддається зміцнюючій термічній обробці. 4. Мідні сплави поділяють на латуні, бронзи і мідно-нікелеві сплави.

**МІДЬ** — рожево-червоний метал з густиною 8960 кг/м<sup>3</sup> і температурою плавлення 1083 °С (символ Cu): 1. Широке застосування міді визначається такими її властивостями як висока електро- і теплопровідність, пластичність і корозійна стійкість. 2. Мідь використовується для виготовлення хімічної апаратури (вакууапаратів, перегонних котлів, змішувачів і т. п.), але особливо широко чиста мідь використовується в електротехніці.

**МІЖКРИСТАЛІТНА КОРОЗІЯ** — корозія металу по межах зерен: 1. Міжкристалітна корозія знижує механічні властивості металу без зміни зовнішнього вигляду його поверхні. 2. Явище міжкристалітної корозії в нержавіючій сталі пов'язане з пониженням корозійної стійкості меж зерен при утворенні карбідів хрому.

**МІКРОСТРУКТУРА** — будова металів і сплавів, що вивчається при великих



збільшеннях (більш ніж в 30 разів):

1. Мікроструктура визначає основні фізико-механічні властивості матеріалу. 2. Мікроструктура сплавів змінюється при нагріванні і охолодженні (при термічній обробці), при пластичній деформації (при куванні, штампуванні, прокатці); 3. Мікроструктуру вивчають на спеціальних візріях-шліфах, які після шліфування і полірування піддають травленню розчинами кислот.

**МІКРОШЛІФ** — візріць з плоскою полірованою поверхнею, підданий травленню розчином кислоти або лугу для виявлення мікроструктури: 1. Протравлені мікрошліфи промивають під струменем води, потім в спирт і сушать фільтрувальним папером або теплим повітрям. 2. Для полірування мікрошліфів чорних металів використовують окис алюмінію чи окис хрому.

**МІСЦЕВА КОРОЗІЯ** — корозія, яка уражає певні ділянки поверхні металів. Місцева корозія може бути у вигляді корозії плямами, виразкової корозії, точкової, підповерхневої і міжкристалітної.

**МІЦНІСТЬ** — властивість матеріалів чинити опір руйнуванню або пластичній деформації під впливом зовнішніх сил: 1. Висока міцність досягається шляхом армування м'якої металевої матриці бездефектними ниткоподібними кристалами металів і неметалів. 2. Міцність металів може бути підвищена легуванням, холодною пластичною деформацією і термічною обробкою. 3. Підвищення міцності металів супроводжується зниженням їх пластичності і в'язкості.

**МОДИФІКАТОРИ** — речовини, що додаються в невеликих кількостях в рідкі сплави з метою впливу на процес кристалізації (подрібнювання або зміна форми структурних складових): 1. Для алюмінієвих сплавів як модифікатори застосовують солі лужних металів, Ti, B, Nb, Zr, а також одночасно Ti і B. 2. Магній

застосовується в якості модифікатора при виплавці високоміцного чавуну. 3. Застосування комплексних модифікаторів дозволяє значно скоротити кількість неметалевих включень, подрібнити зерно і підвищити пластичність сталі.

**МОДИФІКОВАНИЙ ЧАВУН** — чавун з високими механічними властивостями, в якому графіт має кулясту форму: 1. Модифікований чавун відрізняється хорошою міцністю, підвищеною пластичністю і в'язкістю. 2. Введення Sn, Pb, P, Sb, N і інших елементів сприяє отриманню перлітних сірих модифікованих чавунів. 3. Механічні властивості модифікованого чавуну наближаються до властивостей сталі. 4. Високоміцний чавун з кулеподібним графітом отримують введенням в розплав Mg, Ce, Ca, PЗМ, лігатур і комплексних модифікаторів.

**МОДИФІКУВАННЯ** — введення в рідкі метали і сплави спеціальних речовин (модифікаторів) для подрібнення структури і покращення властивостей: 1. Модифікування, окрім покращення механічних властивостей, покращує технологічність сплавів при литті і обробці тиском. 2. Особливо ефективно модифікування литих сплавів. 3. Високоміцний чавун отримують модифікуванням сірих чавунів.

**МОДУЛЬ ПРУЖНОСТІ** — відношення напруження до викликаной ним пружної деформації: 1. Термічна обробка або інші способи зміни структури металу практично не міняють модуля пружності. 2. Модуль пружності зменшується з підвищенням температури. 3. Величина модуля пружності використовується при розрахунках різних конструкцій. 4. Модуль пружності характеризує опір матеріалу пружній деформації.

**МОЗАЇЧНА СТРУКТУРА** — структура кристалу, що складається з дрібних ділянок



(блоків) кристалічної решітки різного орієнтування (розходження в орієнтуванні — менше 10 градусів): 1. Подрібнення блоків мозаїчної структури при різних процесах обробки веде до зміни властивостей металів. 2. У даний час є численні експериментальні засоби для вивчення мозаїчної структури.

**МОЛІБДЕНОВІ СПЛАВИ** — сплави на основі молібдену: 1. Для підвищення технологічних властивостей молібденових сплавів застосовується легування малими кількостями В, Сг, Ni, Та і деяких рідкоземельних елементів. 2. Важливою власти-

вістю молібденових сплавів є їх жароміцність; 3. Молібденові сплави широко застосовуються для виготовлення деталей ракет і інших літальних апаратів.

**МОНОКРИСТАЛ** — окремий кристал з однотипною кристалічною решіткою. 1. Монокристалом даного елемента за допомогою відповідної обробки можна надати єдину орієнтацію. 2. Монокристали застосовують особливо широко в радіотехніці і радіоелектроніці. 3. Монокристали багатьох речовин вирощують штучно.

## Н

**НАКЛЕП** — зміцнення металевих матеріалів під дією холодною пластичної деформації: 1. Наклеп є ефективним методом підвищення витривалості виробів з кованої і литої сталі, а також зварювальних з'єднань. 2. При гарячій пластичній деформації металів наклепу не відбувається, так як він знімається завдяки рекристалізації.

**НАПРУЖЕННЯ** — внутрішні сили, що дорівнюють величині зовнішньої сили, віднесеної до одиниці площі перерізу. Напруження I роду (в об'ємі деталі), II роду (в об'ємі зерен), III роду (в об'ємі елементарних комірок): 1. Для зменшення внутрішніх напружень при гартуванні застосовують різні способи охолодження. 2. Напруження, які збереглися у деталі в результаті охолодження, називаються залишковими напруженнями; 3. Зональні напруження виникають головним чином у результаті технологічних процесів виготовлення деталі.

**НЕМЕТАЛІЧНІ ВКЛЮЧЕННЯ** — макро- і мікрочастинки в металах і сплавах (карбіди, окиси, силікати, сульфідні, нітриди), які утворюються в металі в процесі вироб-

ництва: 1. Неметалічні включення, як правило, погіршують якість металу: знижують опір втомному руйнуванню, пластичність, прогартуваність і т. д.; 2. Склад неметалевих включень частіше за все визначають мікрорентгеноспектральним аналізом.

**НЕПОВНЕ ГАРТУВАННЯ** — гартування сталі, при якому нагрів проводять вище температури  $A_{c1}$ , але нижче температури

$A_{c3}$  чи  $A_{cm}$ : 1. Неповному гартуванню піддають заевтектоїдні сталі. 2. При неповному гартуванні заевтектоїдні сталі мають більш високу твердість за рахунок надлишкового цементиту. 3. Температуру неповного гартування вибирають за правилом:

$$t_{\text{гарт}}^{\circ} = A_{c1} + (30^{\circ} - 50^{\circ}).$$

**НЕРЖАВІЮЧА СТАЛЬ** — сталь, стійка проти корозії в умовах впливу атмосфери і слабоагресивних середовищ: 1. Корозійна стійкість нержавіючих сталей залежить від складу, структури, термічної обробки, а також від складу агресивних середовищ. 2. Хромисті нержавіючі сталі застосовують-

ся як конструкційний матеріал для клапанів гідравлічних пресів, турбінних лопаток, арматури крекінг-установок, ріжучого інструменту, пружин, предметів побуту.

**НИЗЬКИЙ ВІДПАЛ** — відпал сталі чи чавуну з нагріванням нижче температури  $A_{c3}$ : 1. Метою низького відпалу є зменшення внутрішніх напружень при задовільній структурі металу; 2. Низький відпал знаходить застосування при термічній обробці виливок.

**НІКЕЛЕВІ СПЛАВИ** — сплави на основі нікелю: 1. Властивості нікелевих сплавів залежать від технології виробництва і способів обробки. 2. В конструкційних, термоелектричних, магнітом'яких нікелевих сплавах поєднуються висока міцність і підвищена пластичність. 3. Нікелеві сплави

пластичні при високій температурі, піддаються прокатці, волочінню і штампуванню.

**НІТРОЦЕМЕНТАЦІЯ** — те ж саме, що й газове ціанування.

**НОРМАЛІЗАЦІЯ** — термічна обробка сталі або чавуну, яка полягає в нагріванні вище температури фазових перетворень, витримці і подальшому охолодженні на повітрі: 1. Нормалізація надає сталі однорідну дрібнозернисту структуру, покращує тим самим її властивості. 2. В порівнянні з відпаленою сталлю міцність і твердість сталі після нормалізації вища, а пластичність нижча. 3. Для низьковуглецевих нелегованих сталей відпал заміняють нормалізацією як більш простою і дешевою операцією.

## О

**ОКАЛИНОСТІЙКА СТАЛЬ** — те ж саме, що й жаростійка сталь.

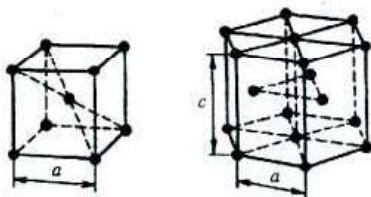
**ОКАЛИНОСТІЙКІСТЬ** — те ж саме, що й жаростійкість.

**ОКСИДУВАННЯ** — навмисне окислення поверхневого шару металевих виробів з метою захисту від корозії: 1. Для алюмінію і його сплавів широко застосовується

електрохімічне оксидування (анодування). 2. В залежності від режиму оксидування і складу сплаву отримують окисні плівки товщиною від долей мікрона до 500—600 мкм. 3. Термоповітряне оксидування виробів зі сплавів типу пермалой досягається нагрівом в електропечі при температурі від 400 до 800 °C на протязі 30—90 хв з подальшим прискореним охолодженням.

## П

**ПАРАМЕТР КРИСТАЛІЧНОЇ РЕШІТКИ** — відстань між атомами по ребру кристалічної решітки: 1. Величина параметра кристалічної решітки вимірюється в ангстремах чи кілоіксах; 2. Зміна параметра кристалічної решітки спостерігається при утворенні твердого розчину.



**ПАСИВУВАННЯ** — перехід поверхні металу в пасивний стан, при якому різко уповільнюється корозія: 1. Пасивування металу починається при потенціалі пасивації  $E_a$  і критичній густині струму  $i_c$ ; 2. Про схильність металу до пасивування судять по концентрації пасивувального додатку чи величині критичної густини струму.

**ПЕРЕОХОЛОДЖЕННЯ** — охолодження речовини нижче температури його рівноважного переходу в інший фазовий стан (наприклад, нижче температури плавлення): 1. При заливанні рідкого металу в холодні металеві форми забезпечується його переохолодження. 2. Необхідна ступінь переохолодження металу при кристалізації залежить від його природи і чистоти. 3. При переохолодженні рідкого сплаву нижче визначеної температури в ньому утворюються стійкі кристалічні зародки.

**ПЕРЛІТ** — механічна суміш фериту і цементиту; одна зі структурних складових сплавів заліза з вуглецем: 1. Зернистий (глобулярний) перліт утворюється з неоднорідного аустеніту при спеціальному відпалі. 2. Механічні властивості перліту суттєво змінюються при зміні розмірів (товщини) феритно-цементитних пластин. 3. Перліт частіше за все має пластинчасту будову і є міцною структурною складовою.

**ПЛАКУВАННЯ** — покриття поверхні одного металу шаром іншого з подальшою прокаткою з метою зміни фізико-хімічних властивостей поверхні: 1. Захисне плакування сплавів алюмінію застосовується для створення антикорозійного шару алюмінію на листах. 2. Перед плакуванням поверхні покриваючого і покривального матеріалів очищають, знежирюють, травлять і промивають.

**ПЛАСТИЧНА ДЕФОРМАЦІЯ** — деформація, яка залишається в матеріалі після

припинення дії сили: 1. Здатність до пластичної деформації є однією з найважливіших властивостей конструкційних матеріалів. 2. При пластичній деформації збільшується густина литого металу і покращуються його механічні властивості. 3. Пластичну деформацію можна використовувати для зміцнення металів. 4. Якщо метал має низьку здатність до пластичної деформації, він схильний до раптових крихких руйнувань.

**ПЛАСТИЧНІСТЬ** — здатність твердих тіл змінювати свою форму без руйнування під дією зовнішніх сил: 1. Чисті метали мають більш високу пластичність, ніж їх сплави. 2. Відновлення пластичності деформованих металічних матеріалів відбувається в результаті рекристалізації. 3. Пластичність залежить не тільки від властивостей матеріалу, але і від умов деформування (температури, швидкості, ступеня деформації і т. п.)

**ПОВЗУЧИСТЬ** — пластична деформація матеріалу за часом під дією постійних напружень, менших за границю текучості: 1. У кадмії помітна повзучість спостерігається при температурі  $-269^{\circ}\text{C}$ . 2. Випробування на повзучість проводять з метою визначення границі повзучості. 3. Повзучість супроводжується зміцненням металу внаслідок пластичної деформації і зняттям зміцнення під впливом підвищеної температури. 4. Явище повзучості властиве практично всім конструкційним матеріалам.

**ПОВНЕ ГАРТУВАННЯ** — гартування сталі з нагрівом до температури вище критичних точок  $A_{c3}$  або  $A_{cm}$ : 1. Повному гартуванню піддаються доєвтектоїдні сталі; 2. Повним гартуванням можна досягнути гомогенізації твердого розчину, а отже, покращення механічних властивостей сталі. 3. Повне гартування доєвтектоїдних сталей треба проводити з температури  $A_{c3} + (30^{\circ}-50^{\circ})$ .



**ПРОГАРТОВУВАНІСТЬ (ПРОЖАРЮВАННЯ)** — здатність сталі чи іншого сплаву сприймати гартування на різну глибину: 1. Прогартуваність є важливою характеристикою для визначення здатності сталі піддаватися гартуванню. 2. За границю прогартуваності переважно приймають напівмартенситну зону, що складається з 50 % мартенситу і 50 % трооститу. 3. Експериментально прогартуваність визначається за допомогою методу торцювого гартування.

**ПРУЖНА ДЕФОРМАЦІЯ** — деформація, що зникає після зняття навантаження, яке її викликає: 1. В металевих матеріалах пружні деформації малі і пропорційні прикладеному напруженню; 2. Пружна деформація характеризується двома основними константами: модулем Юнга і коефіцієнтом Пуассона.

**ПРУЖНІСТЬ** — властивість матеріалів відновлювати свою форму і об'єм після припинення дії внутрішніх сил: 1. Висока пружність характерна для пружної сталі. 2. Модуль пружності (модуль Юнга) характеризує жорсткість матеріалу. 3. Пружність тіл обумовлена силами взаємодії між атомами.

**РАКОВИНИ** — дефекти, що являють собою порожнини (пустоти) в зливках, відливках або деталях: 1. В більшості випадків раковини виявляються при механічній обробці; 2. Раковини виникають в результаті неправильної конструкції виливки, недостатнього живлення виливки рідким металом в процесі затвердіння, надто високої температури заливання і інших причин.

## Р

**РАФІНУВАННЯ** — вилучення шкідливих домішок з металів і сплавів: 1. В останні роки широко стали застосовувати такі методи рафінування як вакуумування, обробка синтетичними шлаками і ін. 2. Електрохімічне рафінування використовується для алюмінію, міді, нікелю, цинку, натрію, свинцю, золота, срібла і інших кольорових металів.

**РЕКРИСТАЛІЗАЦІЙНИЙ ВІДПАЛ** — нагрів холоднодеформованого металу вище температури рекристалізації з метою виправлення структури і зняття наклепу: 1. Рекристалізаційний відпал відновлює механічні властивості сталі і підвищує опір корозії. 2. Режим рекристалізаційного відпалу для деформованих матеріалів вибирають за допомогою діаграм рекристалізації. 3. Рекристалізаційний відпал застосовують між певними операціями волочіння дроту і при інших видах холодної обробки тиском.

**РЕКРИСТАЛІЗАЦІЯ** — відновлення структури і властивостей холоднодеформованого металу при нагріванні: 1. Рекристалізація металів знімає наклеп, відновлює їх фізичні і механічні властивості. 2. Кінетика рекристалізації залежить від складу сплаву, ступеню деформації і інших факторів. 3. Існують дві різновидності рекристалізації: рекристалізація обробки і збиральна рекристалізація.

**РЕЛАКСАЦІЯ** — процес рівномірного розподілення деформації, напружень, хімічного складу, температури і інших характеристик в тілах: 1. Релаксація напруження має особливо важливе значення в техніці. 2. При релаксації напруження сумарна деформація, що складається з пружної і пластичної деформації, зберігається постійною. 3. У металів вище релаксації сильніше проявляється при високих температурах. 4. Релаксацію можна прискорити підвищенням температури.

**РІДКОТЕКУЧИСТЬ** — здатність розплавленого металу заповнювати ливарну форму:

1. Для визначення рідкотекучості металів застосовують технологічні проби, при цьому використовують спіральні і V-подібні форми і кварцеві трубки, які заповнені рідким металом. 2. При високій рідкотекучості сплаву можна отримати відливки складної форми. 3. Крайню рідкотекучість мають сплави евтектичного складу. 4. Рідкотекучість збільшується з підвищенням температури заливки і зі зменшенням теплопровідності металу.

**РОЗКИСЛЕННЯ** — вилучення з розплавлених металів (головним чином сталі,

а також деяких інших сплавів) розчиненого в них кисню: 1. Осаджувальне розкислення проводиться шляхом введення розкислювачів в рідку сталь. 2. При повному розкисленні утворюється спокійна сталь, а при неповному — кипляча сталь.

**РОЗЧИННІСТЬ** — властивість речовини утворювати однорідні суміші (розчини) змінного складу з іншими речовинами (розчинниками): 1. Розчинність газів в рідинах залежить від тиску і температури. 2. Газові раковини у виливах виникають у результаті зменшення розчинності газів у металі при кристалізації.

## С

**САМОДИФУЗІЯ** — переміщення атомів (дифузія), яке не пов'язане зі зміною концентрації в окремих об'ємах: 1. В однокомпонентних структурах самодифузія характеризується енергією активації, що порівнюється з енергією сублімації. 2. Прикладом самодифузії є спонтанне вирівнювання ізотопного складу по всьому об'єму речовини.

**СІРІЙ ЧАВУН** — чавун, в якому весь чи майже весь вуглець знаходиться у вигляді графіту пластинчастої форми: 1. В машинобудуванні в основному застосовується перлітний сірий чавун як більш міцний і твердий. 2. З сірого чавуну виготовляють станини, шестерні, шків, корпусні деталі середньої міцності, поршневі кільця і інші вироби.

**СПЕЦІАЛЬНІ КАРБІДИ** — карбіди, що утворилися різними карбідоутворюючими елементами, крім заліза: 1. Спеціальні карбіди утворюють елементи з великою спорідненістю до вуглецю, наприклад, Ti, Mo і ін. 2. Легуючі елементи переважно розчиняються в основних фазах залізобуглецевих сплавів чи утворюють спеціальні карбіди.

**СПЛАВ** — складна речовина, отримана сплавленням деяких елементів, переважно металевих: 1. Металеві сплави можуть складатися лише з металів (наприклад, латунь — сплав Cu з Zn) чи з металів з невеликою кількістю неметалів (наприклад, чавун і сталь — сплави Fe з C). 2. Будова сплаву залежить від того, в яку взаємодію вступають елементи, що утворюють сплав. 3. Сплави утворюються тільки з тих елементів, які розчиняються один в одному в рідкому стані. 4. Застосування титанових сплавів дозволяє зменшити масу і збільшити міцність автомобільних і дизельних двигунів.

**СТАЛЬ** — сплав заліза з вуглецем (що містить менше 2% C) з можливими додатками інших елементів: 1. Вуглецева і низьколегована сталі для машинобудування виготовляються у відповідності з державними стандартами. 2. Масштаби виробництва сталі характеризують техніко-економічний рівень розвитку держави. 3. Близько 90 % виплавленої в світі сталі є вуглецевою, а 10 % — легованою. 4. Збільшення вмісту



вуглецю (0,05—2,0 %) в сталі веде до зміни її структури і властивостей.

**СТАЛЬ З ОСОБЛИВИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ** — легована сталь зі спеціальними фізико-хімічними властивостями:

1. До числа сталей з особливими властивостями відносяться кислотостійка, нержавіюча, жароміцна, електротехнічна і окалиностійка сталі, а також сталь для постійних магнітів. 2. Для сталі з особливими властивостями характерний низький вміст вуглецю і високий ступінь легування.

**СТАРІННЯ** — зміна властивостей матеріалу внаслідок внутрішніх процесів без суттєвої зміни мікроструктури: 1. Деформаційне старіння може негативно впливати на властивості металів. 2. Інтенсивність старіння визначається умовами експлуатації і структурою металу.

**СТАРІННЯ СПЛАВІВ** — процес розпаду перенасичених твердих розчинів, отриманих після гартування, який відбувається без

нагрівання чи при невеликому нагріванні: 1. Старіння сплавів веде до утворення матеріалів з високими фізико-механічними характеристиками: твердістю, міцністю, магнітними і іншими властивостями. 2. Швидкість старіння сплавів залежить від температури (при підвищенні температури швидкість старіння зростає). 3. Початкові стадії старіння сплавів викликають їх зміцнення.

**СТРУКТУРА** — внутрішня будова матеріалу (металу, сплаву), що вивчається неозброєним оком чи за допомогою спеціальних приладів (оптичних, електронних, рентгенівських і ін.): 1. Стабільна полігонізована структура металу утворюється частіше за все при гарячому пластичному деформуванні. 2. Структура матеріалу визначає його фізичні і механічні властивості.

**СУЩІЛЬНА КОРОЗІЯ** — корозія, яка охопила всю поверхню металу. Сушльну корозію поділяють на рівномірну і нерівномірну в залежності від глибини корозійного руйнування на різних ділянках.

## Т

**ТВЕРДІСТЬ** — опір матеріалу проникненню в нього іншого, більш твердого тіла:

1. Твердість — найбільш поширена характеристика металевих матеріалів, що визначає їх придатність і можливе призначення. 2. Твердість за Роквелом вимірюється в умовних одиницях, за Вікерсом і Брінелем в кг/мм<sup>2</sup>. 3. За значенням твердості сталі можна судити про її міцність.

**ТЕМПЕРАТУРНИЙ КОЕФІЦІЄНТ ЛІНІЙНОГО РОЗШИРЕННЯ** — відносна

зміна довжини тіла при нагріві на 1 °C: 1. Температурний коефіцієнт лінійного розширення, який мало змінюється до температури 100 °C, має сплав інвар.

2. Значення температурного лінійного розширення залежать від вмісту домішок, особливо вуглецю, і технології термічної обробки сплаву.

**ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ** — передача тепла шляхом руху чи коливань електронів, атомів, молекул: 1. Теплопровідність кристалічних тіл обумовлюється рухом електронів і взаємодією атомів один з одним. 2. В основі теплопровідності лежить атомно-молекулярний механізм. 3. Велику теплопровідність мають срібло, мідь, алюміній.

**ТИТАНОВІ СПЛАВИ** — сплави на основі титану: 1. Для титанових сплавів характерні легкість, висока міцність і відмінна



корозійна стійкість. 2. Титанові сплави застосовуються як конструкційні матеріали в багатьох галузях, а саме, в авіації і інших галузях транспортного машинобудування. 3. Титанові сплави можуть піддаватися куванню, штампуванню, прокату, пресуванню, волочінню.

**ТРАВЛЕННЯ** — хімічна і електрохімічна обробка поверхні твердих матеріалів: 1. Технологічне травлення (частіше за все хімічне) застосовується для очищення від окалини або для отримання потрібного вигляду поверхні металевих напівфабрикатів, а також при лудінні і паянні. 2. Хімічне травлення сталі, міді, цинку і магнію здійснюють у водних розчинах сірчаної, соляної або азотної кислоти. 3. При вивченні мікроструктури шліфи піддають травленню в розчинах кислот або лугів.

**ТРИВАЛА МІЦНІСТЬ** — здатність матеріалу чинити опір руйнуванню при тривалому впливі статичного навантаження і високої температури: 1. Характеристикою

тривалої міцності є напруження, що викликає руйнування при даній температурі за даний відрізок часу (границя тривалої міцності). 2. Тривала міцність сталі зростає в результаті легування її молібденом. 3. Стабільність структури жароміцного сплаву є обов'язковою умовою його тривалої міцності.

**ТРИЩИНИ** — порушення суцільності матеріалу або виробу в результаті часткового відриву однієї частини від іншої: 1. Причинами появи гарячих і холодних тріщин можуть бути неправильна конструкція виливки, гострі внутрішні кути у виливках, неправильно підготовлений склад формувальної і стрижневої сумішей, неправильний режим заливки і термічної обробки і багато іншого. 2. Особливо небезпечні тріщини в крихких матеріалах, у холодноломких металах, у конструкціях і апаратах, що піддаються циклічному навантаженню. 3. Тріщини виявляються постукуванням, гідровипробуванням, методом магнітної дефектоскопії і іншими методами.

## У

**УДАРНА В'ЯЗКІСТЬ** — властивість матеріалу чинити опір руйнуванню при ударному навантаженні (символ  $KC$  МДж/м<sup>2</sup>, кгм/см<sup>2</sup>): 1. Визначення ударної в'язкості застосовують як метод оцінки надійності матеріалу. 2. Ударна в'язкість характеризується роботою, затраченою на руйнування взірця при ударі, яка віднесена до площі його поперечного перерізу в місці руйнування. 3. Сірка (і деякі інші елементи), які утворюють неметалеві включення, знижує ударну в'язкість сталі. 4. Для позначення ударної в'язкості додають третю букву, що вказує на вид надрізу на взірці:  $U$ ,  $V$ ,  $T$  ( $KCU$  означає ударну в'язкість

взірця з  $U$ -подібним надрізом,  $KCV$  з  $V$ -подібним,  $KCT$  із тріщиною).

**УСАДКОВІ (УСАДОЧНІ) РАКОВИНИ** — дефекти (пустоти) в зливках і виливках, що утворюються в результаті зменшення об'єму металу при переході з рідкого стану в твердий. 1. Усадкові раковини зосереджуються в місцях затвердіння останніх порцій металу і відрізняються шорсткістю поверхні. 2. У зливках і фасонних виливках усадкову раковину виводять по можливості в спеціальну частину — так званий прибуток.

## Ф

**ФЕРИТ** — твердий розчин вуглецю і легуючих елементів в  $\alpha$ -залізі; одна із структурних складових в сплавах заліза:

1. Вміст вуглецю в низькотемпературному фериті не перевищує 0,02%. 2. Властивості

легованого фериту змінюються при збільшенні вмісту легуючих елементів. 3. Ферит утворюється з аустеніту при повільному охолодженні. 4. Ферит має порівняно високу теплопровідність і електропровідність.

## Х

**ХІМІЧНА КОРОЗІЯ** — самочинне руйнування металу внаслідок хімічної взаємодії з сухими газами або рідкими неелектролітами (нафтою, бензином, гасом, рідким бромом і ін.): 1. Найрозповсюдженішим видом хімічної корозії є корозія металів у газах при високих температурах. 2. Хімічній корозії піддаються деталі, що працюють при підвищених температурах.

**ХОЛОДНОЛАМКІСТЬ** — різке зниження в'язкості і пластичності матеріалу з пониженням температури: 1. Холодноламкість властива сплавам на основі металів з об'ємноцентрованою кубічною решіткою (Fe, Cr, Mo, W ...) і іншим матеріалам. 2. Температура холодноламкості визначається шляхом випробування серії vzірців

з надрізом на удар при різних температурах. 3. Холодноламкість зменшується при очищенні від шкідливих домішок, шляхом легування і термообробки.

**ХРОМУВАННЯ** — дифузійне насичення поверхні металу хромом з метою підвищення поверхневої твердості, зносостійкості, корозійної стійкості і окалиностійкості: 1. Дифузійне хромування надає виробам жаростійкості в повітряному середовищі і середовищі газів, зносостійкість, жароміцність, опір ерозії і корозії в агресивних середовищах. 2. Процес хромування відбувається при температурі 1000—1050 °C з витримкою на протязі декількох годин. 3. При хромуванні середньовуглецева сталь набуває високої твердості і зносостійкості.

## Ц

**ЦЕМЕНТАЦІЯ** — насичення поверхневого шару сталі вуглецем з метою підвищення поверхневої твердості, зносостійкості і граничній витривалості: 1. Газова цементация здійснюється в шахтних печах періодичної дії або в муфельних і безмуфельних печах неперервної дії. 2. Цементация проводиться при температурі 930—950 °C. 3. Існують два основних способи цементации: цементация

в твердому карбюризаторі і газова цементация. 4. Цементация застосовується головним чином для підвищення зносостійкості деталей машин, що труться: зубчастих коліс, розподільних валків двигунів і т. п.

**ЦЕМЕНТИТ** — хімічна сполука заліза з вуглецем ( $Fe_3C$ ); одна з фаз складових залізовуглецевих сплавів: 1. Цементит має

складну ромбічну решітку з щільним упакуванням атомів. 2. Для цементиту характерні висока твердість і низька пластичність.

**ЦІАНУВАННЯ** — одночасне насичення поверхневого шару сталі вуглецем і азотом з метою підвищення її поверхневої твердості, зносостійкості і границі витривалості:

1. Високотемпературне ціанування відбувається при 800—850 °С, а низькотемпературне — при 500—600 °С. 2. Ціанування сталі здійснюється в твердих, рідких і газоподібних середовищах. 3. Газове високотемпературне ціанування називається також нітроцементациєю. 4. Ціанування має ряд переваг у порівнянні з цементациєю і є більш прогресивним процесом.

## Ч

**ЧАВУН** — сплав заліза з вуглецем, що містить понад 2,14 % вуглецю і підвищену кількість домішок. 1. Високоміцні чавуни застосовують для деталей верстатного і кувалдно-пресового обладнання, що працює при високих тисках. 2. Чавун — первинний продукт переробки залізних руд шляхом їх плавлення в доменних печах. 3. Структура чавуну у виливах залежить від хімічного складу і швидкості кристалізації. 4. З основних компонентів чавуну найбільший вплив на його структуру мають вуглець і кремній.

**ЧЕРВОНОЛАМКІСТЬ** — різке зниження пластичності сплавів при температурі гарячої обробки тиском у результаті оплавлення домішок. 1. Червоноламкість приводить до утворення тріщин і руйнування заготовок при великих ступенях обтис-

нення. 2. У мідистій сталі червоноламкість викликається скупченням у поверхневих шарах заготовок деякої кількості міді внаслідок окислення заліза. 3. Марганець захищає сталь від червоноламкості за рахунок утворення сполук MnS. 4. Щоб уникнути червоноламкості, заготовки з мідистої сталі перед гарячим пластичним деформуванням нагрівають у відновлювальному середовищі.

**ЧЕРВОНОСТІЙКІСТЬ** — здатність інструментальної швидкорізальної сталі зберігати високу твердість (структуру мартенситу) при нагріванні до температури 550—600 °С: 1. Червоностійкість є основною властивістю швидкорізальної сталі. 2. Після спеціальної термічної обробки швидкорізальна сталь буде відрізнятись червоностійкістю.

## Ш

**ШВИДКОРІЗАЛЬНА СТАЛЬ** — високолегована інструментальна сталь, яка застосовується для виготовлення відповідного інструменту і забезпечує високу продуктивність різання: 1. Інструмент зі швидкорізальної сталі не втрачає твердості при нагріванні до 560—600 °С і може різати

метал з великою швидкістю, тому сталь і називається швидкорізальною. 2. Для отримання червоностійкості інструмент зі швидкорізальної сталі піддають спеціальній термічній обробці: гартуванню від температури 1240—1300 °С і трьохкратному відпуску при температурі 560—600 °С.



## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Венецкий С. И. Рассказы о металлах. — 2-е изд., доп. — М.: Металлургия, 1975. — 240 с.
2. Волчок И. П. Сопротивление разрушению стали и чугуна. — М.: Металлургия, 1993. — 192 с.
3. Геллер Ю. А., Рахштадт А. Г. Материаловедение: Методы анализа, лабораторные работы и задания. — М.: Металлургия, 1984. — 384 с.
4. Гольдштейн М. И., Грачев С. В., Векслер Ю. Г. Специальные стали. — М.: Металлургия, 1985. — 408 с.
5. Гуляев А. П. Металловедение: Учеб. для вузов. — 6-е изд., перераб. и доп. — М.: Металлургия, 1986. — 544 с.
6. Гумен В. С. Материалознавство: Консп. лекцій: Ч. I. — К.: КПІ, 1991. — 212 с.
7. Еришов Г. С., Бычков Ю. Б. Физико-химические основы рационального легирования сталей и сплавов. — М.: Металлургия, 1982. — 360 с.
8. Золотаревский В. С. Механические свойства металлов. — 3-е изд. — М.: МИСИС, 1998. — 400 с.
9. Карпенко Г. В. Про фізико-хімічну механіку металів. — К.: Наук. думка, 1973. — 176 с.
10. Конструкционные материалы: Справочник. / Б. Н. Арзамасов, В. А. Брострем, Н. А. Буше и др. / Под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. — М.: Машиностроение, 1990. — 688 с.
11. Контроль качества термической обработки стальных полуфабрикатов и деталей: Справочник. / Под общ. ред. В. Д. Кальнера. — М.: Машиностроение, 1984. — 384 с.
12. Кузін О. А. Керування властивостями мікрولهгованих сталей за параметрами внутрішніх поверхонь розділу // Фізико-хімічна механіка матеріалів. — 2000. — № 5. — С. 101—106.
13. Курдюмов Г. В., Утевский Л. М., Энтин Р. И. Превращения в железе и стали. — М.: Наука, 1977. — 236 с.
14. Лахтин Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов: Учеб. для вузов. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Металлургия, 1993. — 447 с.
15. Малюта А. Н. Гиперкомплексные динамические системы. — Львов: Вища шк., 1989. — 111 с.
16. Малюта А. Н. Закономерности системного развития. — К.: Наук. думка, 1990. — 135 с.
17. Малюта А. Н. Система деятельности. — К.: Наук. думка, 1991. — 206 с.
18. Марочник сталей и сплавов. / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Веткин и др. — М., Машиностроение, 1989. — 640 с.

# СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

19. Материаловедение: Учеб. для вузов. / Б. Н. Арзамасов, И. И. Сидорин, Г. Ф. Косолапов и др. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1986. — 384 с.
20. Материаловедение и технология металлов: Учеб. для вузов. / Г. П. Фетисов, М. Г. Карпман, В. М. Матюнин и др. / Под ред. Г. П. Фетисова. — М.: Высшая шк., 2000. — 638 с.
21. Матеріалознавство: Підруч. для втузів. / В. І. Большаков, О. Ю. Береза, О. Ю. Миронова, В. І. Харченко. — Торонто: Базіліан Прес, 1998. — 216 с.
22. Металознавство: Підручник / О. М. Бялік, В. С. Черненко, В. М. Писаренко, Ю. Н. Москаленко. — 2-е вид., перероб і доп. — К.: Політехніка, 2002. — 384 с.
23. Мохорт А. В., Чумак М. Г. Термічна обробка металів: Навч. посібник. — К.: Либідь, 2002. — 512 с.
24. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Металлургия, 1986. — 480 с.
25. Новиков И. И., Строганов Г. Б., Новиков А. И. Металловедение, термообработка и рентгенография. — М.: МИСИС, 1994. — 480 с.
26. Пикеринг Ф. Б. Физическое материаловедение и разработка сталей: Пер. с англ. — М.: Металлургия, 1984. — 184 с.
27. Попович В. В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: Навч. посіб. для вузів: Кн. 1 (Ч. I, II і III). — Львів: УкрДЛТУ, 2000. — 264 с.
28. Романив О. Н. Вязкость разрушения конструкционных сталей. — М.: Металлургия, 1979. — 176 с.
29. Солнцев Ю. П., Пряхин Е. И., Войткун Ф. Материаловедение: Учеб. для вузов. — М.: МИСИС, 1999. — 600 с.
30. Справочник необходимых знаний. — М.: РИПОЛ КЛАССИК, 2000. — 768 с.
31. Статистичний щорічник України за 2001 рік: 36./ За ред. О. Г. Осауленка. — К.: Техніка, 2002. — 646 с.
32. Тушинский Л. И. Теория и технология упрочения металлических материалов. — Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1990. — 306 с.
33. Физическое материаловедение. / Под ред. Р. У. Кана, П. Хаазена: В 3-х тт.: Пер. с нем. — М.: Металлургия, 1987.
34. Энциклопедия неорганических материалов: В 2-х тт. — К.: Изд-во УРЕ, 1977.
35. Яцюк А. І., Яцюк Р. А. Матеріалознавство: Навч. посіб. — К.: ІЗМН, 1996. — 168 с.
36. [http:// w. w. worldsteel. org/](http://w.w.worldsteel.org/)

## КОРОТКІ ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

*Кузін Олег Анатолійович (1950)* — кандидат технічних наук, доцент. Займається моделюванням і оптимізацією структури і властивостей металічних матеріалів. Автор 90 наукових та навчально-методичних публікацій, серед яких 8 патентів та авторських свідоцтв на винаходи. Під його керівництвом підготовлено та захищено кандидатську дисертацію.

У 1973 р. закінчив механіко-технологічний факультет Львівського політехнічного інституту за спеціальністю «Фізика металів». У 1973—1975 рр. працював у Фізико-механічному інституті АН УРСР. В 1976—1979 рр. навчався в аспірантурі. У 1984 р. захистив дисертацію на тему «Мікролегування покращувальних бористих сталей з метою підвищення прогартуваності і конструкційної міцності». Робота була виконана під керівництвом заслуженого працівника вищої школи УРСР, доктора технічних наук, професора М. М. Фетісової. З 1986 р. працює доцентом кафедри фізики металів та матеріалознавства Національного університету «Львівська політехніка».

*Яцюк Ростислав Арсенович (1952)* — кандидат технічних наук, доцент. Займається дослідженнями шляхів усунення крихкості залізоалюмінієвих сталей та створенням нових економислєгованих жаростійких сталей для деталей пічного обладнання. Автор більше 80 наукових та навчально-методичних публікацій, серед яких навчальний посібник «Матеріалознавство» (1996, у співавторстві) та два авторські свідоцтва на винаходи.

У 1974 р. закінчив механіко-технологічний факультет Львівського політехнічного інституту за спеціальністю «Фізика металів». У 1974—1986 рр. працював у Фізико-механічному інституті АН УРСР. У 1984 р. захистив дисертацію на тему «Жаростійкість залізоалюмінієвих сплавів і розробка економічнолегованої сталі для деталей пічного обладнання». Робота була виконана під керівництвом доктора технічних наук, професора І. І. Василенка та кандидата технічних наук В. І. Найчука. У 1986—1988 рр. працював провідним конструктором проектно-конструкторського інституту конвеєробудування. З 1988 р. працює доцентом кафедри охорони праці Національного університету «Львівська політехніка».