

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет «Запорізька політехніка»

ТЕКСТИ (конспект) лекцій з дисципліни

«Теорія ливарних сплавів»

для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка»
освітньої програми «Обладнання та технології

ливарного виробництва»

усіх форм навчання

Частина 2

2019

Тексти (конспект) лекцій з дисципліни «Теорія ливарних сплавів» для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньої програми «Обладнання та технології ливарного виробництва» усіх форм навчання. Частина 2 / Укл.: Г.А.Бялік, В.І.Гонтаренко, Я.А.Василевська. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2019. – 69 с.

Укладачі: Г.А.Бялік, доцент, канд. техн. наук
В.І.Гонтаренко, професор, канд. техн. наук
Я.А.Василевська, асистент

Рецензент: Е.І.Цивірко, професор, д-р техн. наук

Відповідальний
за випуск: В.В.Луцьков, професор, д-р техн. наук

Затверджено
на засіданні кафедри
«Машини і технологія
ливарного виробництва»

Протокол № 10
від 14 червня 2019р.

Рекомендовано до видання
НМК Інженерно-фізичного
факультету

Протокол № 10
від 24 червня 2019р.

ЗМІСТ

Частина 2

6 НЕМЕТАЛЕВІ ВКРАПЛЕННЯ В ЛИВАРНИХ СПЛАВАХ	93
6.1 Неметалеві вкраплення в литій сталі.....	95
6.1.1 Класифікація неметалевих вкраплень.....	95
6.1.2 Оксидні вкраплення.....	95
6.1.3 Сульфідні вкраплення.....	97
6.1.4 Нітридні вкраплення.....	99
6.1.5 Екзогенні вкраплення.....	101
6.1.6 Методи аналізу неметалевих вкраплень.....	102
6.1.7 Вплив неметалевих вкраплень на механічні властивості сталі.....	122
7 СИНТЕЗ ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ	135
7.1 Методи синтезу сплавів.....	135
7.2 Класифікація сплавів.....	136
7.3 Вибір основи сплаву.....	137
7.4. Основи легування сплавів.....	147
7.5 Зміцнення ливарних сплавів шляхом термічної обробки.....	149
7.6 Модифікування ливарних сплавів.....	150
7.7 Прогнозування доцільності розробки нових або удосконалення існуючих ливарних сплавів.....	153
7.8 Особливості синтезу окремих ливарних сплавів.....	155
7.8.1 Сплави на основі заліза.....	156
7.8.2 Сплави на основі алюмінію.....	156
7.8.3 Сплави на основі міді.....	157
ЛІТЕРАТУРА.....	158

6 НЕМЕТАЛЕВІ ВКРАПЛЕННЯ В ЛИВАРНИХ СПЛАВАХ

12 квітня 1912 року в Атлантичному океані затонув найбільший пасажирський корабель того часу – Титанік (рис. 6.1), що зіткнувся з айсбергом. Цей корабель був для того часу шедевром кораблебудування з точки зору безпеки, тому катастрофа довгий час вважалась загадковою. В кінці вісімдесятих років минулого сторіччя Титанік було знайдено на глибині трьох кілометрів на дні Атлантичного океану. За допомогою автоматичних підводних пристроїв окремі металеві елементи конструкції було піднято на поверхню і досліджено методами сучасного фізичного металознавства. Ці дослідження показали, що заклепки, за допомогою яких були скріплені між собою елементи корпусу корабля, було виготовлено зі сталі, що містила велику кількість неметалевих вкраплень (рис. 6.2). Було виплавлено сталь за технологією початку ХХ сторіччя з неметалевими вкрапленнями. З цієї сталі виготовили заклепки. Випробування цих заклепок показало, що їх міцність була значно нижчою за межу міцності, що було прийнято при розрахунках корпусу корабля. Таким чином, сталь з великою кількістю неметалевих вкраплень була основною причиною загибелі цього корабля.

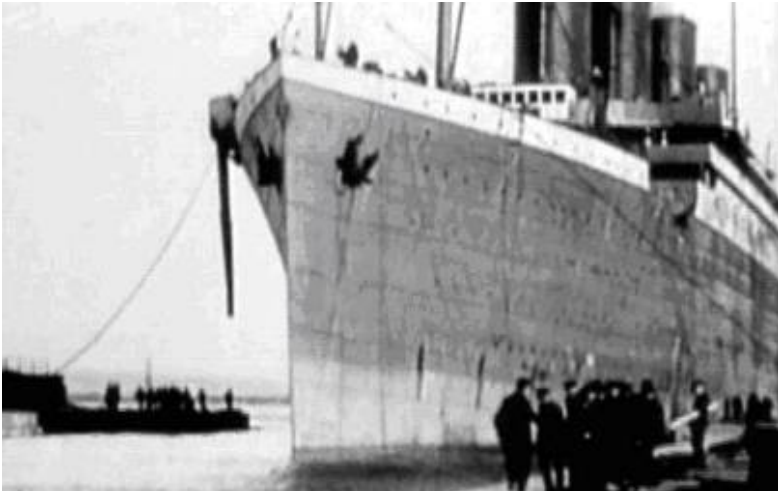


Рисунок 6.1 – Пасажирський корабель Титанік

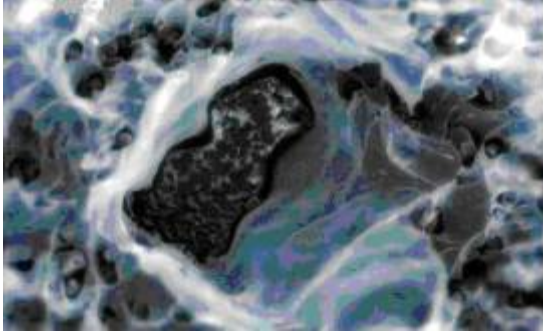


Рисунок 6.2 – Неметалеві вкраплення в зламі заклепки з корабля Титанік

В питаннях дослідження неметалевих вкраплень досягнуто значних успіхів. Сформувались наукові школи, які протягом довгого часу вивчали неметалеві вкраплення. Серед вчених, які очолювали ці школи, слід відмітити академіка А.М. Самаріна, професорів В.І. Явойського, М.І Віноград, Д.Я. Поволоцького. Одну з найвідоміших українських наукових шкіл заснував та довгий час очолював член - кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор Ю.А. Шульте (рис.6.3).



Рисунок 6.3 – Член-кор. НАН України, доктор технічних наук, професор Ю.А. Шульте

6.1 Неметалеві вкраплення в литій сталі

Академік А.А.Байков наступним чином формулював умови, що є необхідними для одержання якісної сталі: мінімум шкідливих домішок, відсутність газових пухирів та чистота за неметалевими вкрапленнями. Боротьба зі шкідливими домішками і газами ведеться в литій сталі досить успішно, третя умова – чистота за неметалевими вкрапленнями порушується найбільш часто. Вкраплення порушують однорідність литої сталі та погіршують її властивості.

6.1.1 Класифікація неметалевих вкраплень

За походженням неметалеві вкраплення в сталі розділяють на дві групи: ендегенні, що утворюються в процесі реакцій металургійного переділу, та екзогенні, що механічно попадають в сталь.

За хімічним складом неметалеві вкраплення розділяють на сульфіди, оксиди, нітриди та фосфіди – хімічні з'єднання деяких металевих компонентів, що входять до складу сталі, відповідно із сіркою, киснем, азотом та фосфором.

За часом утворення ендегенні вкраплення розділяють на первинні, що утворюються внаслідок зниження розчинності елементів - розкислювачів при зниженні температури рідкої сталі від температури випуску з плавильного агрегату до температури розливки, вторинні, що утворюються при подальшому зниженні температури від температури розливки до температури ліквідус, третинні, що утворюються в двофазній зоні та четвертинні, або післякристалізаційні, що утворюються в твердій сталі.

За зовнішньою формою неметалеві вкраплення розділяють на глобулярні, гострокутові та неправильної форми.

Крім того, неметалеві вкраплення розділяють на кристалічні та аморфні.

6.1.2 Оксидні вкраплення

Оксидні вкраплення утворюються на всіх етапах плавки та розливки сталі. Але найбільша кількість цих включень утворюється в процесі розкислення сталі. При цьому утворюються переважно оксиди тих елементів–розкислювачів, що в даних умовах мають найвищу зді-

бність до розкислення. Наприклад, в сталі, що є розкисленою марганцем та кремнієм, в залежності від їх вмісту, зустрічаються тільки силікати різної основності (рис. 6.4). В сталі, що є розкисленою алюмінієм, переважним типом оксидних включень є глинозем або корунд (рис. 6.5). Слід відмітити, що в присутності більш слабких розкислювачів, суттєво зростає ефективність алюмінію. Тому в сталі, що розкислена алюмінієм, можна знайти комплекси складних алюмокремнемарганцевих силікатів (рис. 6.6).

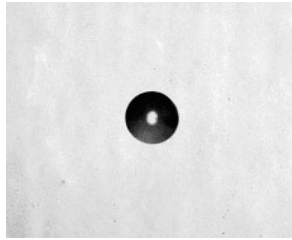


Рисунок 6.4 – Силікатне вкраплення в литій вуглецевій сталі ($\times 500$)

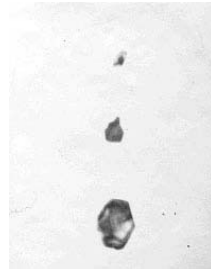
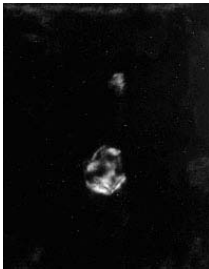


Рисунок 6.5 – Вкраплення корунду в сталі, що є розкисленою алюмінієм ($\times 500$)

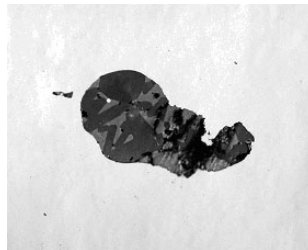


Рисунок 6.6 – Складний алюмокремнемарганцевий силікат ($\times 500$)

Всі типи оксидних включень, що утворюються в сталі, мають характерні зовнішні ознаки та можуть бути досить точно визначеними при металографічних методах контролю.

6.1.3 Сульфідні вкраплення

Розчинність сірки в твердому залізі є дуже малою – нижчою, ніж 0,003 %. Додатки легуючих елементів дещо її збільшують, але можна вважати, що сірка в твердій сталі знаходиться переважно у вигляді сульфідних вкраплень. З усіх елементів, що присутні в сталі, саме сірка має найбільший коефіцієнт сегрегації, внаслідок чого навіть за умов низького її вмісту в великих виливках можливе виникнення досить великих сульфідних вкраплень.

Утворення сульфідних вкраплень відбувається переважно у двофазній зоні, тому ці вкраплення мають схилість виділятися на межах литих зерен.

В литій сталі утворюються головним чином сульфіди марганцю та сульфіди заліза. Температура плавлення сульфіду марганцю 1610 °С, сульфіду заліза – 1190 °С. Сульфід заліза із залізом утворює евтектику з температурою плавлення 985 °С, що має схильність до розташування по межах литих зерен. При нагріванні виливків або зливків до такої температури спостерігають червоноламкість сталі. Щоб уникнути цього явища слід прагнути в литій сталі мати переважно сульфіди марганцю.

В вуглецевих машинобудівних литих сталях зі звичайним (0,4 – 0,7 %) вмістом марганцю переважають сульфіди наступного складу: 75 % сульфіду марганцю та 25 % сульфіду заліза. Форма сульфідних вкраплень залежить від особливостей кінцевого розкислення сталі. В сталі, що є розкисленою марганцем та кремнієм, сульфіди мають глобулярну форму (рис. 6.7), в сталі, що є розкисленою алюмінієм, сульфіди або утворюють ланцюжки по межах зерен, (рис. 6.8), або мають кристалічну форму і розташовуються дезорієнтовано відносно меж зерен (рис. 6.9). В легованих сталях частина сірки є пов'язаною з хромом, молібденом, титаном та іншими легуючими елементами. На склад сульфідних вкраплень вирішальний вплив має співвідношення вмістів марганцю та сірки. При співвідношенні $Mn/S = 1,5$ сталь містить 80 % сульфіду марганцю, при співвідношенні $Mn/S \geq 10$, що є характерним для більшості стандартних вуглецевих та легованих ста-

лей для виливків, в складі сульфідів міститься 95 % сульфиду марганцю та 5 % сульфиду заліза.

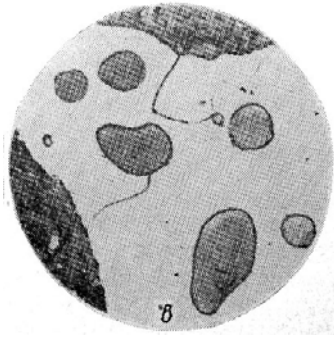


Рисунок 6.7 – Сульфідні вкраплення в сталі, розкисленій кремнієм і марганцем

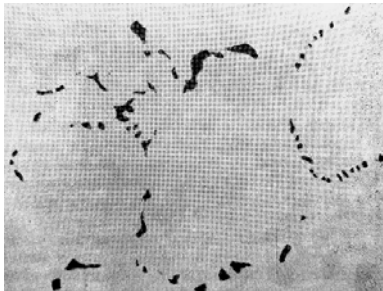


Рисунок 6.8 – Сульфідні вкраплення в сталі, розкисленій алюмінієм (0,02 %)



Рисунок 6.9 – Сульфідні вкраплення в сталі, розкисленій алюмінієм (0,1 %)

6.1.4 Нітридні вкраплення

Зараз більша частина сталей для виливків виплавляється в електропечах, зокрема у дугових. При цьому вміст азоту в вуглецевій та легованій сталі досягає 0,01 – 0,012 %. Згідно термодинамічним розрахункам, в сталі, що є розкисленою тільки кремнієм, азот знаходиться тільки в твердому розчині, тому в такій сталі нітридні вкраплення відсутні. Вкраплення нітридів з'являються в литій сталі, що містить такі елементи, як титан, цирконій, церій, лантан, алюміній, ванадій. Найбільш стійкі нітриди утворюють титан і цирконій. Нітриди титану мають кубічну форму золотистого або рожевого кольору (рис. 6.10). Склад вкраплень відповідає формулі TiN. Температура плавлення нітриду титану дорівнює 2900 °С.

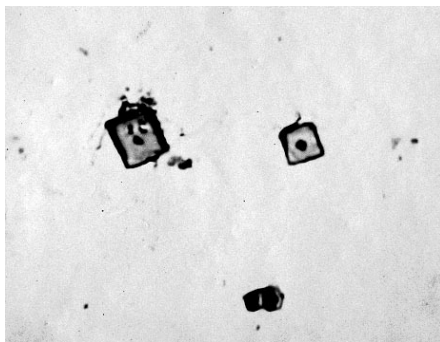


Рисунок 6.10 – Вкраплення нітридів титану (x500)

Нітриди алюмінію спостерігаються в литій сталі, що містить алюміній в якості легуючого елементу, у вигляді дрібних гострокутних кристалів сірого кольору (рис. 6.11). При звичайних концентраціях алюмінію та азоту у вуглецевих сталях нітриди алюмінію мають вигляд дрібнодисперсних часток, що можна побачити тільки за допомогою електронного мікроскопу (рис. 6.12).

В сталі з відносно великим ($\geq 0,05\%$) вмістом фосфору можливо утворення специфічних неметалевих вкраплень – фосфідної евтектики (рис.6.13).

Фосфідна евтектика уявляє собою складні комплекси $Fe - Fe_nP_m - MnP_y$. Найчастіше ці вкраплення зустрічаються в сталі 110Г13Л з великим вмістом фосфору.

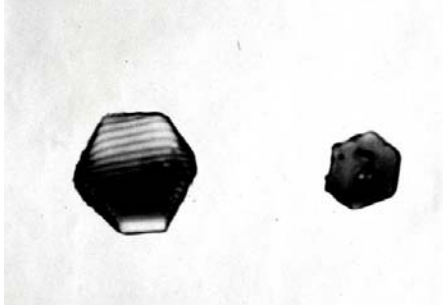


Рисунок 6.11 – Вкраплення нітридів алюмінію в сталі 38ХМЮА ($\times 500$)

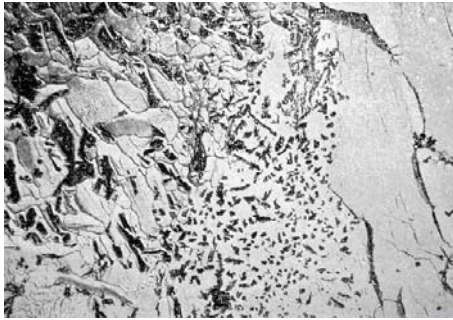


Рисунок 6.12 – Вкраплення нітридів алюмінію на межах зерен вуглецевої сталі ($\times 5000$)



$\times 115$



$\times 1350$

Рисунок 6.13 – Вкраплення фосфідної евтектики в високомарганцевій сталі

6.1.5 Екзогенні вкраплення

Екзогенні вкраплення – це сторонні частки, що потрапляють у сталь. Зазвичай, ці вкраплення уявляють собою піщані зерна, що відірвалися від поверхні ливарної форми, зерна вогнетривких матеріалів, частки пічного шлаку. Але в балансі екзогенних вкраплень, що зустрічаються у сталевих виливках, переважають вкраплення, що були утворенні внаслідок ерозії ливарної форми. При цьому більшу схильність до забруднення екзогенними вкрапленнями мають виливки, що було одержано у сирих формах. Ливарний пригар можна розглядати як сукупність екзогенних вкраплень, що розташовано на поверхні сталевих виливків.

Встановлено, що ступінь забруднення сталі екзогенними вкрапленнями є тісно пов'язаною саме з явищем пригару.

Відомо, що чим більшим є відношення вмісту марганцю до вмісту кремнію, тим більшим є забрудненість литої сталі. Тому сталь 110Г13Л є найбільш небезпечною відносно забрудненості екзогенними вкрапленнями. В цій сталі екзогенні вкраплення уявляють собою відірвані від поверхні форми та ошлаковані закисом марганцю піщані частинки (рис. 6.14).

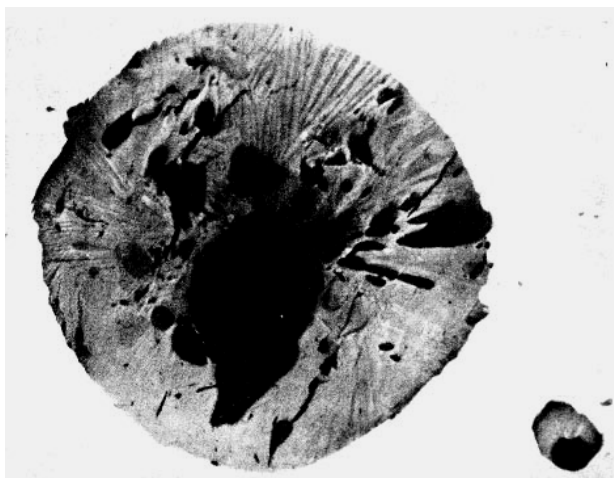


Рисунок 6.14 – Екзогенне вкраплення у виливку зі сталі 110Г13Л

6.1.6 Методи аналізу неметалевих вкраплень

Для встановлення впливу неметалевих вкраплень на фізико-механічні властивості сталі треба визначити склад неметалевих вкраплень та їх кількість.

Склад неметалевих вкраплень визначається за допомогою методів якісного аналізу, кількість – за допомогою методів кількісного аналізу.

Методи якісного аналізу неметалевих вкраплень можна розділити на чотири основні групи: хімічний, петрографічний, фізичний та металографічний. Розглянемо ці методи.

Хімічний метод передбачає вилучення вкраплень з металу та їх наступний хімічний аналіз. В процесі вилучення неметалеві вкраплення не повинні бути зруйновані, повинен бути збережений їх хімічний склад, необхідно запобігти забрудненню вкраплень сторонніми речовинами або сполуками вторинних реакцій.

Найбільш розповсюдженим засобом вилучення неметалевих вкраплень з ливарних сплавів є електролітичний. Сутність його полягає в анодному розчиненні в спеціальному електроліті металевого зразка і осадженні в судині з колодію неметалевих вкраплень у вигляді осадку. Колодій уявляє собою 4 % розчин нітроцелюлози в суміші етилового спирту (1 частина) та ефіру (7 частин).

Тонкий шар колодію вільно пропускає іони, але є непроникним для твердих часток субмікроскопічних розмірів. Схема електролітичного вилучення неметалевих вкраплень наведена на рисунку 6.15.

Циліндричний зразок 1 з'єднано з позитивним полюсом джерела постійного струму. Зразок має діаметр 15 – 20 мм і довжину 120 – 150 мм. Він оточений колодієвою судиною 4 і розташований в ванні 2 з електролітом 5. Катод 3 з'єднано з негативним полюсом джерела постійного струму. Вилучені неметалеві вкраплення, а також карбіди у вигляді осадку 6, утримуються всередині колодієвої судини. Карбіди за допомогою певних хімічних реактивів розчиняються, залишаються лише неметалеві вкраплення, що потім зважуються на чутливих терезах. Таким чином визначають загальний ваговий вміст неметалевих вкраплень в металі. Хімічний склад вкраплень визначають спеціальними мікрохімічними методами.

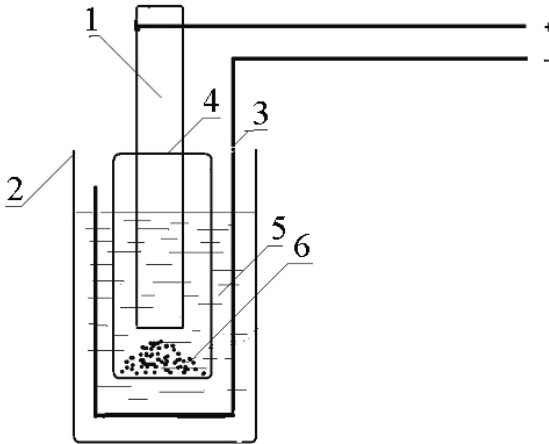


Рисунок 6.15 – Схема електролітичного вилучення неметалевих вкраплень

Хімічний метод визначення неметалевих вкраплень має суттєві недоліки. Немає впевненості, що вкраплення після вилучення та подальшої хімічної обробки збереглися в первинному вигляді. Цей метод не дає відомостей про форму вкраплень, їх розподіл, здібність до деформування. Процес вилучення вкраплень та наступного їх аналізу є дуже тривалими.

Визначити склад вилучених неметалевих вкраплень за їх мінералогічними ознаками дозволяє петрографічний аналіз. Він здійснюється за допомогою поляризаційних мікроскопів МИН-4 (рис.6.16), МИН-5, МИН-8, AMPVIVAL.

Петрографічним методом можна визначити морфологічні ознаки вкраплень: розмір, форму, забарвленість, прозорість, оптичні константи – показник переломлення, двопереломлення.

Препарат для петрографічного аналізу уявляє собою невелику кількість вилучених включень, що розміщуються між предметним та покривним склом у краплині імерсійної рідини. Цей препарат спостерігається в прохідному поляризованому світлі. Для визначення природи вкраплень треба знати їх форму. Вкраплення можуть бути правильної кристалічної (ідіоморфної) форми, округлої (глобулярної) та неправильної (уламкової) форми. Ідіоморфними можуть бути тільки ендегенні вкраплення. Уламкова форма спостерігається найчастіше у екзогенних вкраплень



Рисунок 6.16 – Поляризаційний мікроскоп МИН-4

Крім форми спостерігається забарвлення краплень. Деякі краплень змінюють забарвлення при обертанні столика мікроскопу. Це оптичне явище зветься плеохроїзмом та спостерігається у анізотропних краплень.

Показник переломлення визначають імерсійним методом, для чого краплень занурюють в імерсійну рідину.

Окремі неметалеві краплень можна вилучити локально безпосередньо з поверхні металографічного шліфа. Для цього використовують мікроскоп типу МБС – 9 або МБС – 10, обладнаний двокоординатним предметним столиком. Один з окулярів вилучають і замість нього встановлюють освітлювач. Це дозволяє спостерігати неметалеві краплень в світлому полі зору. На поверхню шліфа навколо неметалевого краплень наносять краплю електроліту. Шліф з'єднується з позитивним полюсом джерела постійного струму. Негативний полюс з'єднується з гострозаточеною голкою, зробленою з нержавіючої сталі. За допомогою цієї голки виконується локальне розчинення металу

навколо неметалевого вкраплення. Потім вкраплення за допомогою іншої голки, змоченої в кедровому мастилі, вилучається з поверхні металу і може бути досліджене петрографічним або мікрохімічним методом.

Вилучені з металу неметалеві вкраплення можна проаналізувати фізичними методами, до яких відносяться рентгенографічний, мікрорентгеноспектральний, електроннографічний та електронномікроскопічний методи.

Для одержання рентгенограм з осаду вилучених неметалевих вкраплень виготовляють циліндричний зразок діаметром 0,2 – 0,6 мм. Цей зразок фотографується в рентгенівській стандартній камері Дебая. Анод рентгенівської трубки слід обирати з таким розрахунком, щоб відповідне випромінювання не збуджувало вторинного характеристичного випромінювання в самому зразку. Результати рентгенограми порівнюються з даними спеціальних довідників, після чого вирішується питання про фазовий склад вкраплення.

Електроннографічний метод визначення фазового складу неметалевих вкраплень має певні переваги над рентгенографічним: швидкість аналізу та більшу чутливість. Цей метод реалізується за допомогою спеціального приладу – електроннографу, або за допомогою універсального трансмісійного (того, що просвічує) електронного мікроскопу, що може працювати в режимі дифракції. Препарат з вилучених з ливарних сплавів для електроннографічних досліджень неметалевих вкраплень готується наступним чином. На скляну пластинку наноситься крапля суспензії неметалевих вкраплень в дистильованій воді. Після висихання води в вакуумі на пластину напилується тонка вуглецева плівка. Плівка гострою голкою розділюється на квадрати розміром 2×2 мм, що відокремлюються від скляної пластини в судині з дистильованою водою. Відокремлені квадратні препарати поміщають на мідні сітки – об'єктуотримувачі електронного мікроскопу, після чого досліджують в цьому приладі в режимі дифракції.

Рентгеноспектральний мікроаналіз неметалевих вкраплень здійснюється за допомогою спеціальних приладів – рентгеноспектральних мікроаналізаторів (рис. 6.17). Принцип роботи рентгеноспектрального мікроаналізатора на прикладі приладу САМЕВАХ наведено на рисунку 6.18.

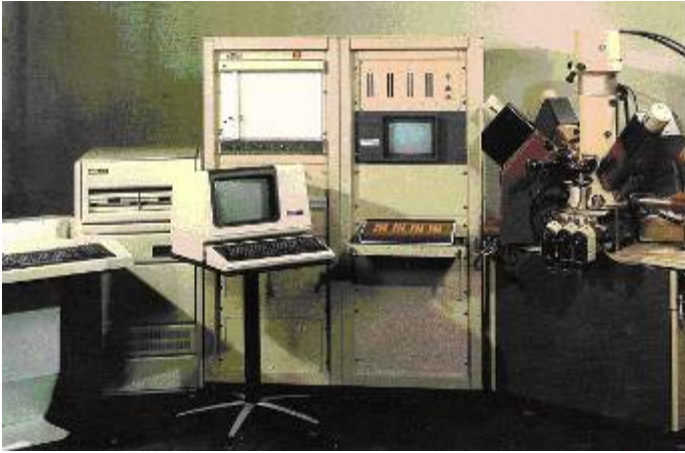


Рисунок 6.17 – Рентгеноспектральний мікроаналізатор CAMEBAX

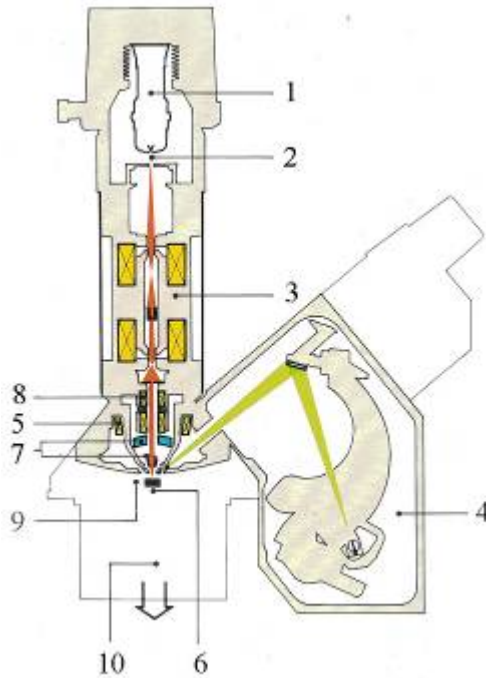


Рисунок 6.18 – Принцип роботи рентгеноспектрального мікроаналізатора

Електронна гармата 1 створює потік прискорених електронів 2, що, за допомогою системи електромагнітних лінз 3, фокусується на об'єкті 6 у вигляді гостросфокусованого електронного зонда діаметром 1 – 2 мкм. Він збуджує в неметалевому вкрапленні характеристичне рентгенівське випромінювання з локальністю порядку 5 мкм. Це випромінювання розкладається в рентгенівський спектр і аналізується в спектрометрі 4. Відхиляюча електромагнітна система 5, 8, забезпечує роботу приладу в растровому режимі. Робочий вакуум в колоні 9 створюється та підтримується за допомогою вакуумної системи 10. Спостереження неметалевих вкраплень на поверхні шліфа здійснюється за допомогою оптичного мікроскопу (рис. 6.19), що складається з дзеркального мікрооб'єктиву 3 двох плоских дзеркал 1 та 5, що виводять оптичне зображення з колони і бінокулярного окуляру 4. Поблизу об'єкту 6, розташований детектор відбитих електронів 7.

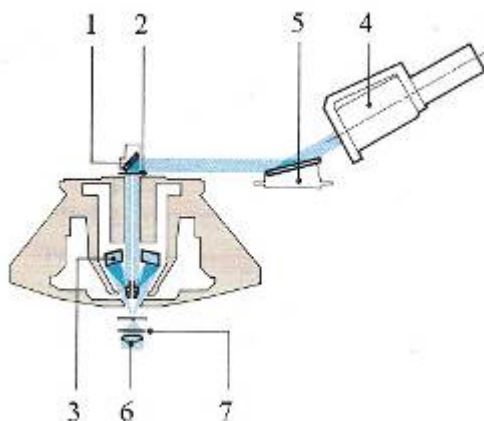


Рисунок 6.19 – Схема оптичного мікроскопу рентгеноспектрального мікроаналізатора CAMEBAX

Рентгеноспектральний мікроаналіз неметалевих вкраплень здійснюється двома методами: лінійним, та одержанням зображення вкраплення в характеристичному рентгенівському випромінюванні різних хімічних елементів.

При лінійному аналізі електронний зонд послідовно перетинає поверхню неметалевих вкраплень по лінії, одночасно вторинний

приклад викреслює діаграму розподілу певного хімічного елементу по пересіченню вкраплення. Приклад лінійного аналізу великого екзогенного вкраплення флюсу у виливку, що було одержано електрошлаковим методом, наведено на рисунку 6.20.

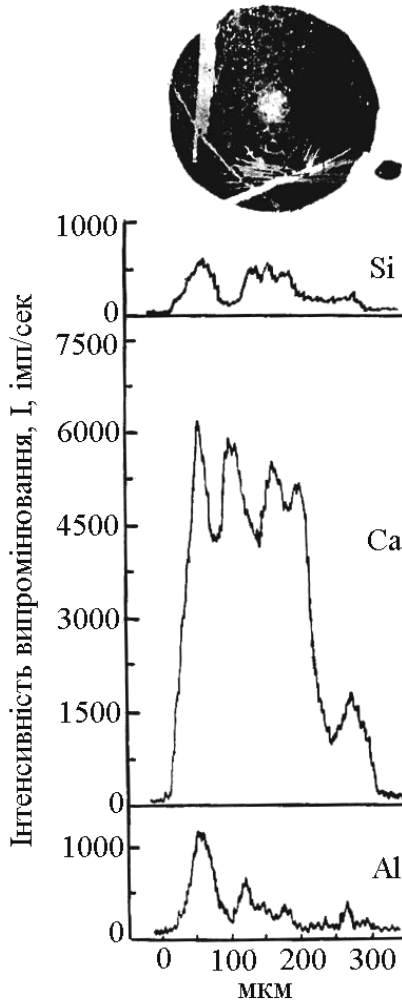


Рисунок 6.20 – Лінійний аналіз екзогенного неметалевого вкраплення

В процесі лінійного аналізу вимірюється інтенсивність характеристичного рентгенівського випромінювання окремих елементів. Це дозволяє, в порівнянні з інтенсивністю характеристичного рентгенівського випромінювання еталонів (як правило, чистих елементів), провести кількісний аналіз неметалевого вкраплення.

За методом зовнішнього стандарту при суворо ідентичних умовах вимірюється інтенсивність, J_x , ліній, наприклад, K_{α} , елементу А в зразку, в якому визначається його вміст, C_A^X , та інтенсивність, J_E , тієї ж самої лінії на еталоні з відповідним вмістом, C_A^E .

$$\frac{C_A^X}{C_A^E} = \frac{J_X}{J_E} \cdot f, \quad (6.1)$$

де f – поправочний коефіцієнт, що може бути більшим або меншим за одиницю.

Поглинання випромінювання даного елементу основою зменшує інтенсивність його характеристичного випромінювання. Флуоресцентне збудження додаткового випромінювання цього елементу за рахунок випромінювання інших елементів може збільшити результат аналізу. Тому точне визначення коефіцієнту f – це дуже складна задача, особливо у випадку наявності в складі легких елементів: кисню, азоту, вуглецю. Сучасні прилади для рентгеноспектрального мікроаналізу мають спеціалізовані комп'ютери з відповідним програмним забезпеченням.

Зображення неметалевих вкраплень в характеристичному рентгенівському випромінюванні – це якісний аналіз, що визначає топографію розподілу окремих хімічних елементів на площині пересічення неметалевого вкраплення. Приклад такого аналізу наведено на рисунку 6.21.

Дрібнодисперсні неметалеві вкраплення, що екстрагуються одноступінними вуглецевими репліками з поверхні шліфів або зламів, можуть бути дослідженими методом мікродифракції.

В режимі мікродифракції від екстрагованих неметалевих вкраплень одержуються мікродифрактограми, що можуть бути кільцевими (від полікристалічних вкраплень) або крапчастими (від ідіоморфних монокристалічних вкраплень).

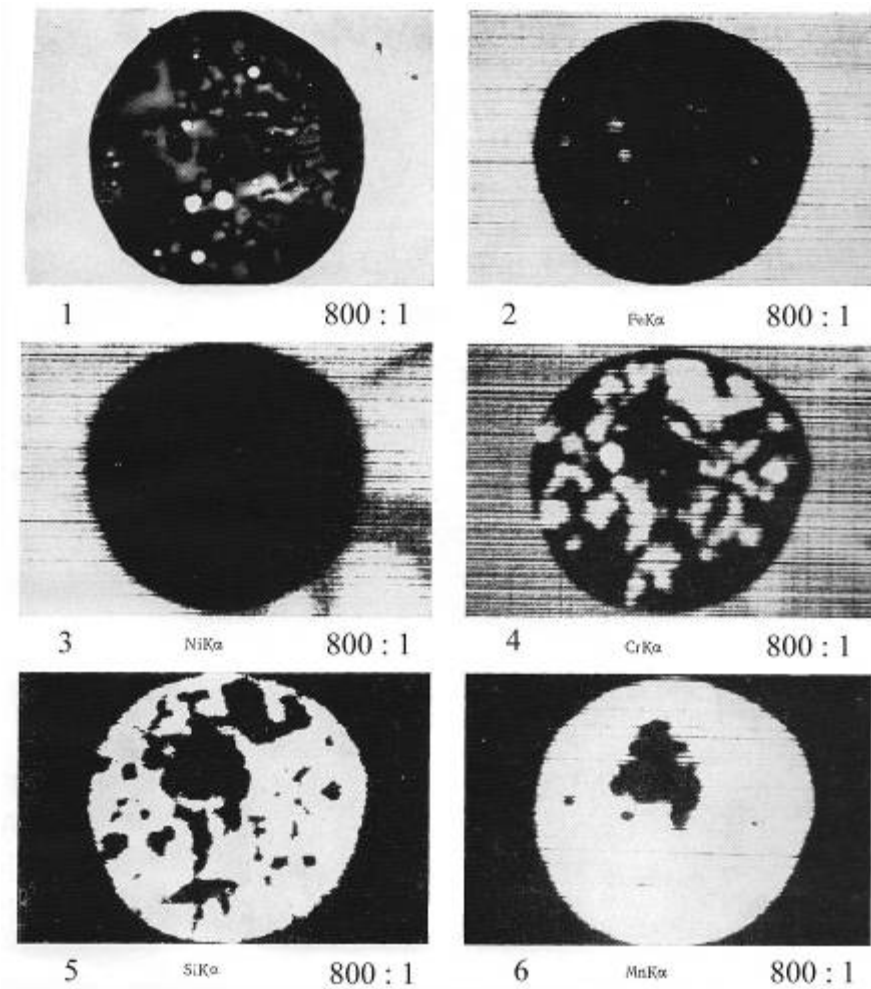


Рисунок 6.21 – Зображення неметалевого вкраплення в відбитих електронах (1) і в характерному рентгенівському випромінюванні Fe (2), Ni (3), Cr (4), Si (5), Mn (6)

Для розшифровки мікродифрактограми необхідно спочатку визначити постійну даного електронного мікроскопу C . Для цього треба одержати мікродифрактограму еталонної речовини з відомими довідковими міжплоскісними відстанями d . Найчастіше використовують NaCl, або MgO. Дифрактограму від полікристалічної MgO наведено на рисунку 6.22. Постійна приладу визначається за формулою:

$$C = d_{ET} \cdot r_{ET}, \quad (6.2)$$

де d_{ET} – міжплоскісна відстань еталонної речовини;

r_{ET} – відстань від центру мікродифрактограми до відповідного рефлексу на мікродифрактограмі еталонної речовини.

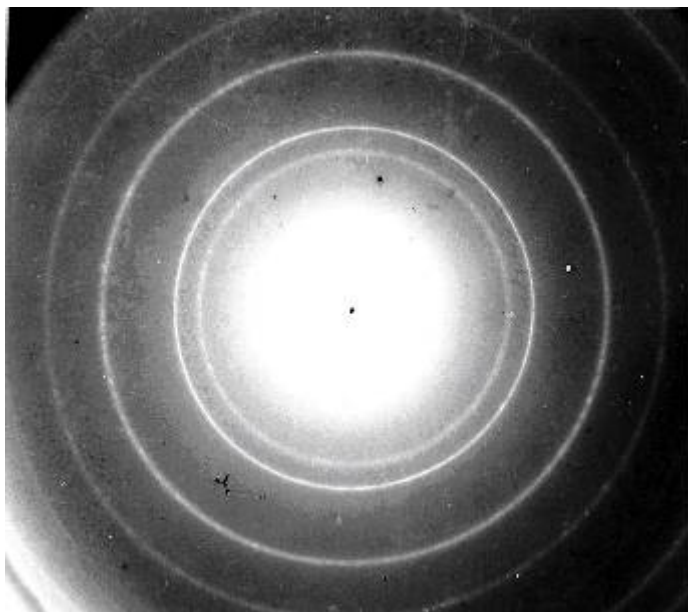


Рисунок 6.22 – Дифрактограма від полікристалічної MgO

На рисунку 6.23 наведено мікроелектронограму від монокристалічного неметалевого вкраплення.

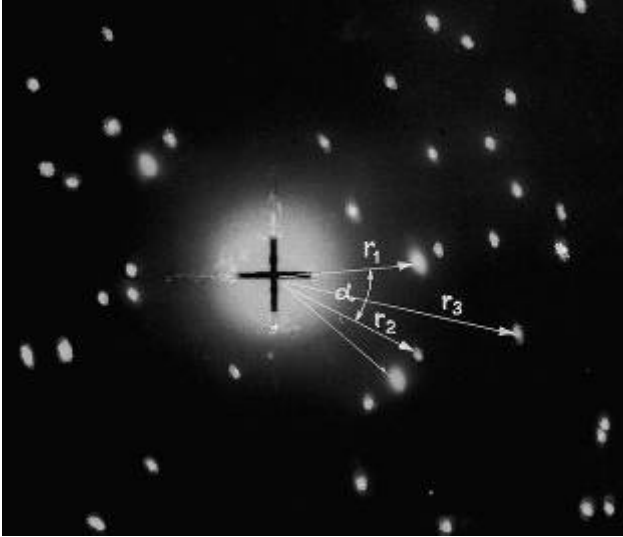


Рисунок 6.23 – Мікроелектронограма від монокристалічного неметалевого вкраплення

При розрахунку крапчастої мікродифрактограми виділяється елементарна чарунка кристалічної решітки і вимірюються її параметри r_1 , r_2 , r_3 та кут між двома будь-якими векторами, α (рис. 6.23). Далі розраховуються міжплоскісні відстані $d_1 = C/r_1$, $d_2 = C/r_2$, $d_3 = C/r_3$. За довідковими даними обирається речовина, міжплоскісні відстані якої відрізняються від розрахованих не більше, ніж на 0,2 нм (0,02 Å). Кожній міжплоскісній відстані відповідають індекси (hkl). Правильність розшифрування мікродифрактограми перевіряється двома засобами:

- 1) сума індексів сторін паралелограму, що утворюється радіусами r_1 та r_2 , повинна дорівнювати індексу його діагоналі;
- 2) кут α_x повинен дорівнювати куту α табличної речовини.

Найпростішим та найбільш зручним є металографічний метод. Він дозволяє досить швидко встановити природу вкраплення. Вкраплення вивчаються під металографічним мікроскопом безпосередньо на металографічних шліфах. При якісному металографічному дослідженні повинні бути встановлені наступні ознаки вкраплення: форма і розташування їх на шліфі, колір в світлому полі зору, колір в темному полі зору та ступінь їх прозорості, анізотропність або ізотропність в

поляризованому світлі, твердість, дія на вкраплення певних хімічних реактивів.

Колір вкраплення при спостереженні під мікроскопом залежить від збільшення: чим більше збільшення, тим світліше колір. При використанні імерсійних об'єктивів слід враховувати, що імерсія змінює здібність вкраплень до віддзеркалення.

Прозорість вкраплень – одна з найважливіших ознак, за яким ці вкраплення поділяються на прозорі та непрозорі. Ступінь прозорості краще визначати при спостереженні в темному полі зору, або в поляризованому світлі.

За ознакою анізотропії вкраплення розділяються на анізотропні та ізотропні. Анізотропні вкраплення змінюють свій колір при обертанні столика мікроскопу. На колір ізотропних вкраплень обертання столика не впливає.

Доцільно визначати вкраплення за певною схемою (рис.6.24), при цьому треба поступово виключати групи вкраплень, що об'єднані однаковими ознаками. В основу схеми покладено розділення вкраплень за їх прозорістю. Це дозволяє розділити вкраплення на дві великі групи та вилучити при дослідженні одну з них.

Для вирішення питання щодо впливу на властивості литого металу неметалевих вкраплень треба знати кількість останніх. Контроль сталі за забрудненістю неметалевими вкрапленнями виконується згідно методик ГОСТ 1778-70 "Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений." Цим стандартом передбачені чотири методи:

метод Ш – порівняння з еталонними шкалами (для досліджень деформованого металу);

метод К – підрахунок кількості вкраплень (для досліджень деформованого і литого металу);

метод П – підрахунок кількості і вмісту неметалевих вкраплень в об'ємних відсотках (для литого і деформованого металу);

метод Л – лінійний підрахунок вкраплень (для виливків).

Вибір методу контролю та норми припустимої забрудненості передбачаються в стандартах і технічних умовах на відповідну металопродукцію.

Метод Ш має 14 варіантів (від Ш1 до Ш14). За п'ятибальною шкалою оцінюють:

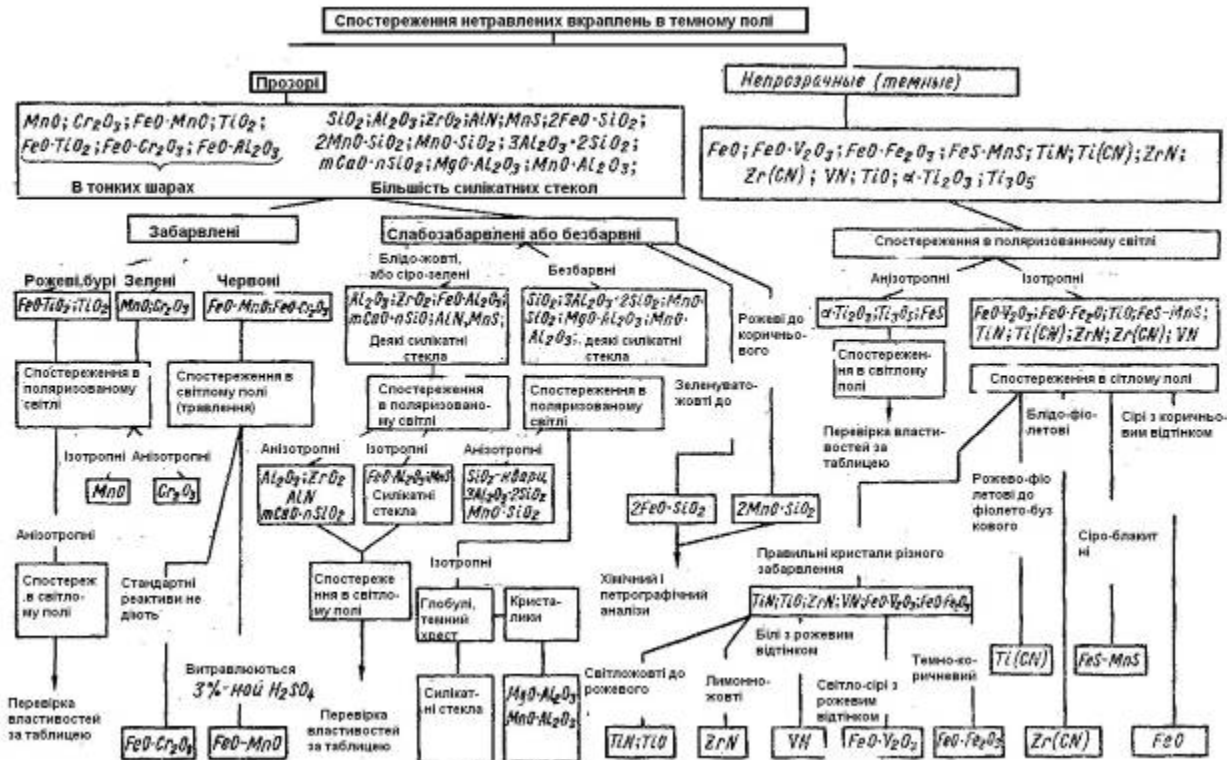


Рисунок 6.24 – Схема дослідження неметалевих вкраплень

- оксиди стрічкові (ОС) – вкраплення дрібних частинок, розташованих групами у вигляді рядків;
- оксиди крапкові (ОК) – кристали простих або складних окисів, що розташовано по всій поверхні шліфа;
- силікати крихкі (СК) – рядки кристалічних вкраплень, що розташовано вздовж напрямку деформації;
- силікати пластичні (СП) – пластично деформовані силікати, що витягнуто в напрямку деформації;
- силікати недеформовані – силікати глобулярної або неправильної форми;
- сульфідні (С) – пластичні, витягнуті в напрямку деформації поодинокі вкраплення або групи вкраплень;
- нітриди рядкові (НР) – поодинокий рядок з високою щільністю вкраплень або декілька коротких рядків;
- нітриди крапкові (НК) – будь-як розташовані на поверхні шліфу включення нітридів або карбонітридів;
- нітриди алюмінію (НА) – дрібні кристали нітридів алюмінію у вигляді рядків, або будь-як розташовані на поверхні шліфу.

Еталонні шкали для оцінки оксидних (кисневих) вкраплень наведено на рисунку 6.25, для оцінки сульфідних та нітридних вкраплень – на рисунку 6.26.

Забрудненість вкрапленнями оцінюється двома методами: за максимальним балом і за середнім балом.

Метод К. Кількість вкраплень, що мають розміри більші за встановлені, підраховуються під мікроскопом при 170 – 180 –кратному збільшенні. Ціна поділу окулярної шкали 0,007 мм. Кількість кисневих, сульфідних та нітридних вкраплень визначають роздільно за розмірними групами:

I група – вкраплення завбільшки від 1 до 2 поділів окулярної шкали (7 – 14 мкм);

II група – вкраплення завбільшки від 2 до 3 поділів окулярної шкали (15 – 21 мкм);

III група – вкраплення завбільшки від 3 до 4 поділів окулярної шкали (22 – 28 мкм);

IV група – вкраплення завбільшки від 4 до 5 поділів окулярної шкали (29 – 35 мкм);

V група – вкраплення завбільшки від 5 до 6 поділів окулярної шкали (36 – 42 мкм).

Бали	Кисневі вкраплення									
	Оксиди			Силікати						
	Рядкові		Крапкові	Крихкозруйновані силікати			Пластичнодеформовані силікати		Недеформовані силікати	
	а	б	а	а	б	в	а	б	а	б
1										
2										
3										
4										
5										

Рисунок 6.25 – Еталонні шкали для оцінки оксидних вкраплень методом Ш

Бали	Сульфіди		Нітридні вкраплення				
			Титану		Алюмінію		
	а	б	а	б	а	а	б
1							
2							
3							
4							
5							

Рисунок 6.26 – Еталонні шкали для оцінки сульфідних і нітридних вкраплень

За допомогою окулярної шкали вимірюють діаметр або товщину вкраплень, близьких у пересіченні до круга або квадрату, або максимальний та мінімальний розміри вкраплень іншої форми. Коли відношення максимального розміру вкраплення до мінімального не перевищує 2, то розмір вкраплення визначають, як середнє арифметичне.

Критерієм оцінки металу ϵ : для варіанту K1 кількість вкраплень кожної групи на площині 24 см^2 , для варіанту K2 – загальна кількість вкраплень (починаючи з 2 групи) на площині 24 см^2 .

Метод П. Підрахунок кількості вкраплень з урахуванням їх розмірів. Використовується переважно при проведенні дослідницьких робіт. Розмір вкраплень визначають за допомогою окулярної шкали. Кожне вкраплення відносять до певної розмірної групи згідно таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Розподіл вкраплень за розмірами в поділах окулярної шкали

Групи вкраплень	Середнє значення груп за площиною вкраплень	Розмір вкраплень в поділах окулярної шкали		Площина вкраплень, поділи окулярної шкали в квадраті
		за діаметром	за стороною квадрату	
1	$\frac{1}{4}$	0,5 - 0,7	0,4 – 0,6	0,18 – 0,35
2	$\frac{1}{2}$	> 0,7 - 0,9	> 0,6 – 0,8	> 0,35 – 0,7
3	1	> 0,9 – 1,3	> 0,8 – 1,2	> 0,7 – 1,4
4	2	> 1,3 – 1,9	> 1,2 – 1,7	> 1,4 – 2,8
5	4	> 1,9 – 2,7	> 1,7 – 2,4	> 2,8 – 5,6
6	8	> 2,7 – 3,8	> 2,4 – 3,4	> 5,6 – 11,3
7	16	> 3,8 – 5,4	> 3,4 – 4,8	> 11,3 – 22,6
8	32	> 5,4 – 7,6	> 4,8 – 6,7	> 22,6 – 45,1
9	64	> 7,6 – 10,7	> 6,7 – 9,5	> 45,1 – 90,2
10	128	> 10,7 – 15,2	> 9,5 – 13,4	> 90,2 – 180,5
11	256	> 15,2 – 21,4	> 13,4 – 19,0	> 180,5 – 361,0
12	512	> 21,4 – 30,3	> 19,0 – 26,9	> 361,0 – 722,0
13	1024	> 30,3 – 42,9	> 26,9 – 38,0	> 722,0 – 1444,0

Примітка. Групи побудовано за зростанням площини вкраплень у геометричній прогресії зі знаменником 2.

В залежності від збільшення метод П має варіанти: П1 – $\times 300$; П2 – $\times 400$; П3 – $\times 500$; П4 – $\times 600$.

В кожному полі зору визначають розміри усіх або деяких видів вкраплень в залежності від мети дослідження. Результати підрахунку фіксуються для кожного виду вкраплень окремо.

Для контролю однієї плавки проглядають на 6 шліфах 750 полів зору (варіанти П1 та П2) і 2250 полів зору (варіанти П3 та П4).

Критерії оцінки забрудненості металу за методом П:

1) вміст вкраплень в об'ємних відсотках;

2) кількість вкраплень певних розмірних груп на площі 100 мм^2 .

Для підрахунку площі, що займають вкраплення на шліфі, кількість вкраплень кожної групи множать на середнє значення площі включень цієї групи. Одержані для всіх груп добутки підсумовують.

Середню площу вкраплень, $f_{\text{СЕР}}$, в одному полі зору розраховують за формулою:

$$f_{\text{СЕР}} = \frac{f}{n}, \quad (6.3)$$

де f – загальна площа вкраплень;

n – кількість полів зору.

Вміст вкраплень в об'ємних відсотках визначають за формулою:

$$V = f_{\text{СЕР}} \cdot K, \quad (6.4)$$

де K – коефіцієнт;

$$K = 100 \cdot F^{-1};$$

$$F = \frac{\pi \cdot D^2}{4} - \text{площа поля зору на шліфі};$$

D – діаметр поля зору в поділах окулярної шкали.

Лінійний метод полягає у вимірюванні та підсумовуванні довжин відрізків прямої лінії, що проходить крізь неметалеві вкраплення, на певній довжині пересічної прямої.

Згідно лінійному методу видимі в мікроскоп неметалеві вкраплення пересікаються прямою лінією або рядом ліній. Контури пересічень неметалевих вкраплень на шліфі розділять ці лінії на окремі від-

різки. Коли підсумувати довжини відрізків, що потрапляють на неметалеві вкраплення і розділити цю суму на загальну довжину пересічних, то одержана частка (згідно принципу Кавальєрі – Акера) буде відповідати долі площини шліфа або об'єму металу, що займають неметалеві вкраплення.

Метод Л кількісної оцінки неметалевих вкраплень має два варіанти: Л1 та Л2. Метод Л1 використовується при збільшенні $\times 300$, Л2 – при збільшенні $\times 500$.

За цим методом шліф за допомогою мікрометричних гвинтів мікроскопу пересувається по лінії. Загальна довжина цієї лінії складає 100 мм. За допомогою окулярної шкали вимірюють максимальні розміри включень, що попадають у перехрестя окуляру і фіксують їх відповідно до певних розмірних груп. Забрудненість оцінюють сукупно за всіма видами вкраплень, або окремо по оксидним, сульфідним і нітридним вкрапленням.

Індекс забрудненості, I, обчислюють за формулою:

$$I = \frac{B \cdot \sum A_i \cdot M_i}{L}, \quad (6.5)$$

де B – ціна поділу окулярної шкали при даному збільшенні, мкм;

A_i – середнє значення розмірів вкраплень даної розмірної групи в поділах окулярної шкали;

M_i – кількість вкраплень даної розмірної групи;

L – довжина лінії підрахунку, мкм.

Зараз лінійний метод є особливо актуальним тому, що саме він є основою для методів автоматичного мікроаналізу, що використовують принцип сканування мікроструктури.

Системи автоматичного аналізу мікроструктури можна розділити на три групи. До першої групи відносяться так звані "цифрові" мікроскопи, в яких зображення поля зору за допомогою відеокамери або цифрового фотоапарату і фреймграбберу (платі вводу) передається в комп'ютер і обробляється в останньому системою аналізу зображень за допомогою спеціальних програм. Спрощена схема цифрового мікроскопу наведена на рисунку 6.27.

При використанні цифрового мікроскопу оператор несе відповідальність як за вибір об'єкту так і за умови спостереження.



Рисунок 6.27 – Схема цифрового мікроскопу

Іншу групу утворюють автоматизовані мікроскопи, вбудована автоматика яких спрощує вибір умов спостереження, контролює переміщення і фокусування зразків. Спрощена схема автоматизованого мікроскопу наведена на рисунку 6.28, його зовнішній вигляд – на рисунку 6.29.



Рисунок 6.28 – Схема автоматизованого мікроскопу

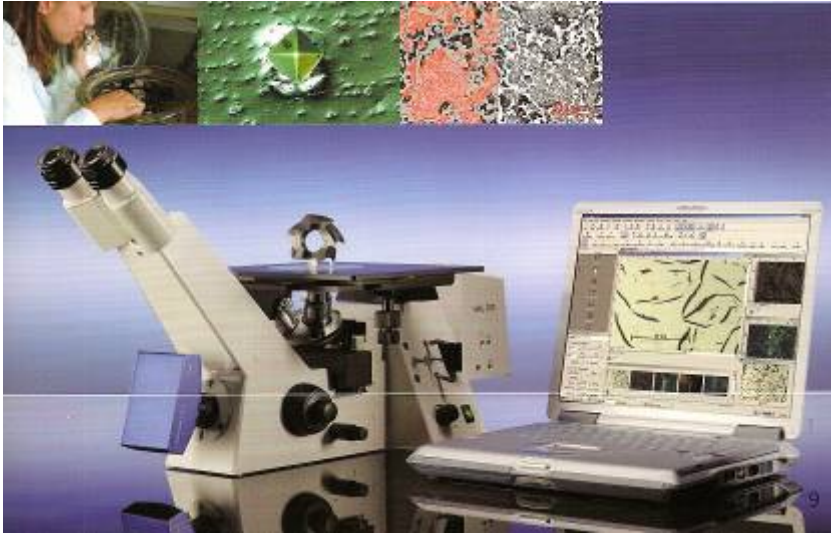


Рисунок 6.29 – Автоматизований мікроскоп Axiovert 40 MAT фірми Carl Zeiss

6.1.7 Вплив неметалевих вкраплень на механічні властивості сталі

Вміст неметалевих вкраплень в сталі не перевищує декількох сотих часток відсотку. Найпростіші розрахунки доводять, що навіть за умов вмісту неметалевих вкраплень, що дорівнює одному відсотку, пересічення зразків для механічних випробувань зменшується також на один відсоток. Відповідно, зменшення властивостей міцності має бути майже непомітним і знаходиться в межах похибки механічних випробувань. Але слід відмітити, що неметалеві вкраплення є дуже небезпечними концентраторами напружень. Вони сприяють зародженню тріщин. Дія неметалевих вкраплень, як концентраторів напружень, значно підсилюється, у випадках коли вкраплення розташовані на межах зерен. Саме тому сульфіді другого типу суттєво знижують пластичні властивості та ударну в'язкість. На рисунку 6.30 наведено вплив типу сульфідів на пластичні властивості та ударну в'язкість литої вуглецевої сталі.

На рисунку 6.31 наведено вплив об'ємного відсотку сульфідних вкраплень на ударну в'язкість високоміцної сталі 30ХГСН2А електрошлакового (ЕШП) і вакуумнодугового (ВДП) переплавів.

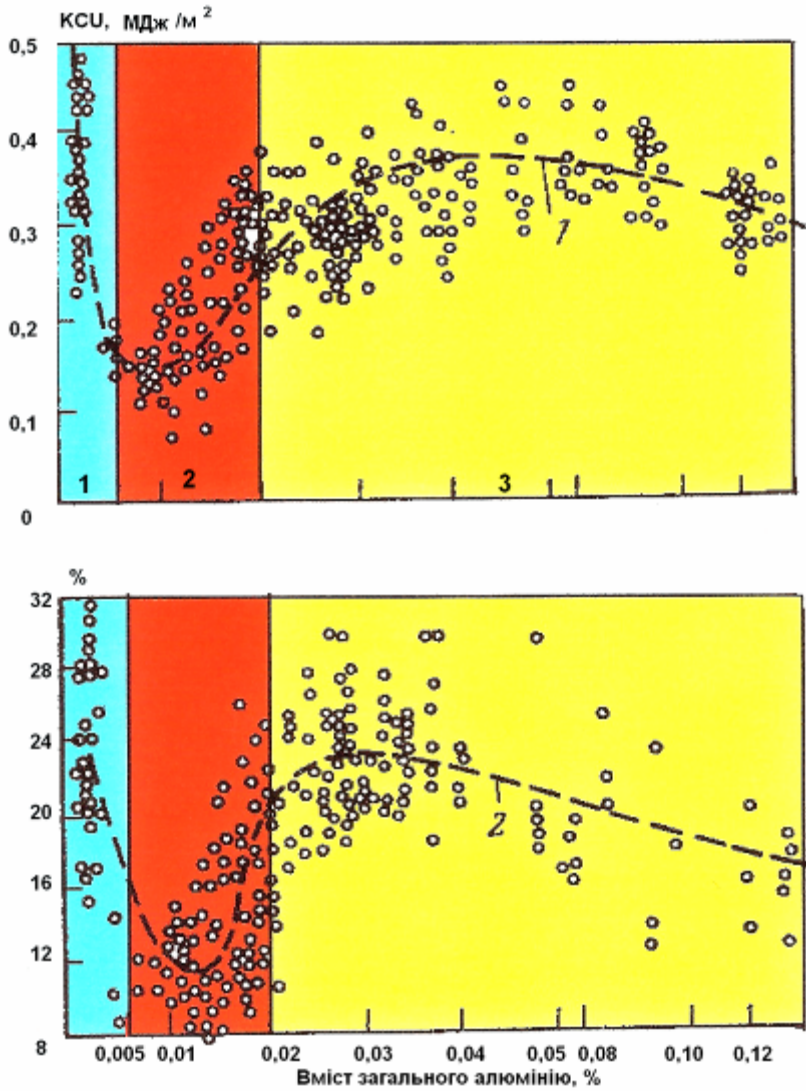


Рисунок 6.30 – Вплив типу сульфідів на пластичні властивості і ударну в'язкість сталі



Рисунок 6.31 – Вплив сульфідних вкраплень на ударну в'язкість висококомірної сталі

Розташовані на межах зерен сульфіди другого типу суттєво погіршують пластичні властивості та ударну в'язкість.

На рисунку 6.32,а, наведено макрозлам зразку литої сталі з великим (0,1 %) вмістом сірки. Він має, так званий, шаруватий характер. Згідно результатам мікрофрактографічних досліджень, руйнація відбулась на межах литих зерен, де сульфідні вкраплення другого типу утворюють так званий "рельєф міст", що нагадує мапу міста (рис. 6.32,б).

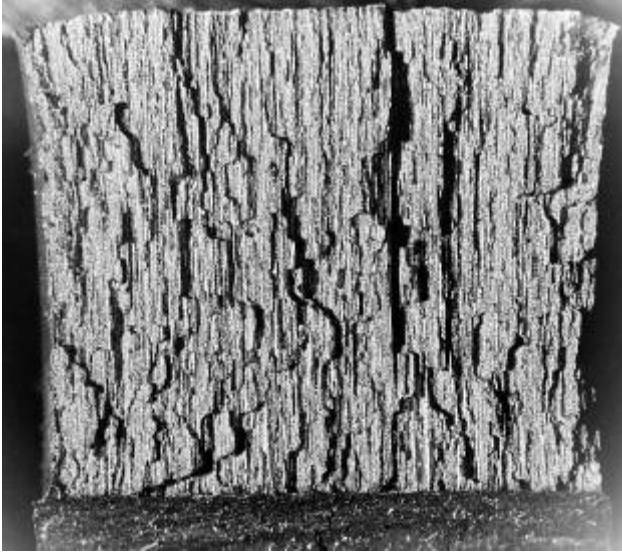
Більшість неметалевих вкраплень утворюється або в рідкій сталі, або в двофазній зоні. При охолодженні сталі, внаслідок різниці коефіцієнтів теплового розширення неметалевих вкраплень і металу, в останньому виникають значні розтягуючі напруження. Ці напруження можна в першому наближенні визначити за формулою:

$$\sigma = E \cdot x \cdot \varepsilon, \quad (6.6)$$

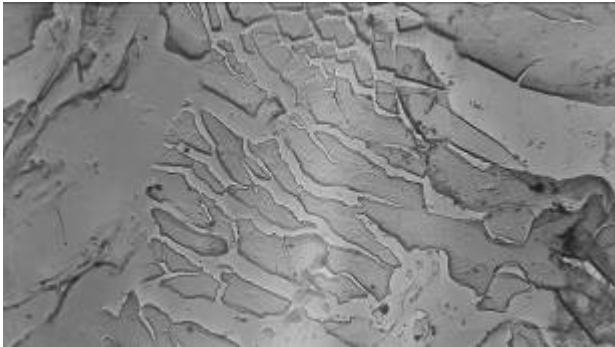
де E – модуль пружності;

ε – деформація.

Деформація чисельно дорівнює добутку температурного інтервалу охолодження сталі та різниці коефіцієнтів лінійного розширення сталі та неметалевого вкраплення. Результати розрахунків наведено у таблиці 6.2.



а



б

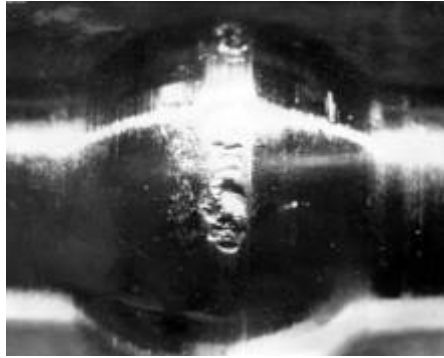
Рисунок 6.32 – Структура макро- (а) і мікроламу (б) сталі з великим (0,1 %) вмістом сірки.

Таблиця 6.2 – Напруження, що виникають навколо неметалевих вкраплень в литій сталі

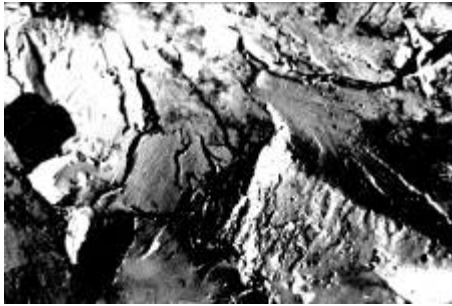
Вкраплення	Різниця коефіцієнтів теплового розширення сталі та неметалевого вкраплення	Напруження навколо неметалевого вкраплення, σ , Мпа
SiO ₂	0,0056	1008
Al ₂ O ₃	0,0028	294

Згідно до результатів розрахунків, напруження навколо неметалевих вкраплень значно перевищують межу текучості. Ці локальні напруження сприяють зародженню тріщин, що підтверджується при мікрофрактографічних дослідженнях зламів сталі. На рисунку 6.33,а наведено зону втомленої руйнації зразку кулькопідшипникової сталі після випробувань на контактну втомленість. В зоні зародження тріщини спостерігали гострокутові неметалеві вкраплення корунду, що були оточені ділянкою крихкого мікрозламу (рис. 6.33, б). В зоні доламу мікрозлам був теж крихким, але проходив по елементах структурних складових, що є характерними для цієї сталі, тобто по зернах перліту та карбідах (рис. 6.33, в).

Фізико-механічні властивості литої сталі є суттєво залежними від розмірів дійсного зерна аустеніту, що формується під час закінчення нагріву під закалювання. Але існує небезпека зростання аустенітного зерна при температурах вищих за 900°C. Зростанню аустенітного зерна можна запобігти за допомогою утворення на межах аустенітних зерен дрібнодисперсних вкраплень нітридів алюмінію. Саме ці вкраплення наведено на рисунку 6.12. Взагалі вкраплення нітридів алюмінію утворюються в твердій сталі при остатньому вмісті алюмінію більше 0,01%. Але дрібнодисперсні нітриди алюмінію утворюються в досить вузькому концентраційному інтервалі – від 0,01 до 0,015% при вмісті азоту 0,01 – 0,012 %. При більшому вмісті азоту утворюються, так звані, плівчасті вкраплення нітридів алюмінію (рис. 6.34), що суттєво погіршують ударну в'язкість сталі та сприяють появленню деяких специфічних дефектів сталі, що виявляються при дослідженні макрозламів (рис. 6.35).



а



б



в

а – макрозлам (так званий пітінг), х 10;
 б – мікротлам в зоні зародження тріщини, х 3800;
 в – мікротлам в зоні доламу, х 3800.

Рисунок 6.33 – Втомлена руйнація зразку кулькопідшипникової сталі після випробувань на контактну витривалість.

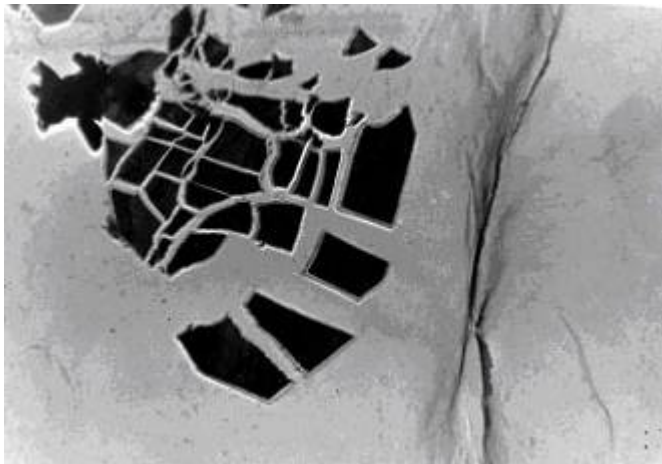


Рисунок 6.34 – Плівчасті вкраплення нітрідів алюмінію на межах зерен
($\times 4000$)



Рисунок 6.35 – Дефект макрозламу, викликаний плівчастими нітридами алюмінію

Відомо, (дивись розділ 3.5) що в'язкість руйнації, що визначається за допомогою коефіцієнту K_{1C} є важливою характеристикою високоміцної литої сталі, призначеної для виготовлення відповідальних машинобудівних деталей. Коефіцієнт K_{1C} – це інтегральна характеристика металу, він визначається на зразках спеціальної форми з концентраторами напружень у вигляді втомленої тріщини. Під зовнішнім навантаженням у вершини тріщини виникає зона пластичної деформації, розмір якої можна визначити за допомогою рівняння:

$$r_y = \frac{K_{1C} \cdot (1 - 2 \cdot \mu)^2}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_{0,2}^2}, \quad (6.7)$$

де K_{1C} – коефіцієнт інтенсивності напружень;

μ – коефіцієнт Пуассона;

$\sigma_{0,2}^2$ – умовна межа текучості сталі.

Неметалеві вкраплення можна розглядати, як мікроконцентратори напружень, навколо яких під навантаженням теж виникає зона пластичної деформації. Ця зона після руйнації зразку фіксується на мікрофрактограмі зламу у вигляді локальної ділянки з ознаками пластичної деформації, що оточує неметалеве вкраплення (рис. 6.36).

Величину такої деформації можна визначити, коли неметалеве вкраплення зруйноване, і окремі його фрагменти зсунулися. Якщо визначити розміри окремих часток зруйнованого вкраплення і відстань між останніми, можна визначити локальне відносне подовження, δ_l , сталі безпосередньо біля вкраплення:

$$\delta = \frac{a_1 + a_2 + \Delta a}{a_1 + a_2} \cdot 100\%, \quad (6.8)$$

де a_1, a_2 – розміри окремих фрагментів вкраплення;

Δa – відстань між фрагментами вкраплення.

Вигляд зони локальної пластичної деформації залежить від топографії вкраплень та виду напружень, що передують руйнації металу. Можна виділити два основні типи руйнації металу навколо неметалевих вкраплень. В першому випадку визначальними є нормальні напруження, що має місце при внутризереній руйнації за схемою, наведеною на рисунку 6.37,а. Навколо вкраплення утворюється порожнина, решта металу, що з'єднує окремі мікрооб'єми стає тонкішою і

руйнується відривом. Мікрофрактограма має вигляд, наведений на рисунку 6.37,б.

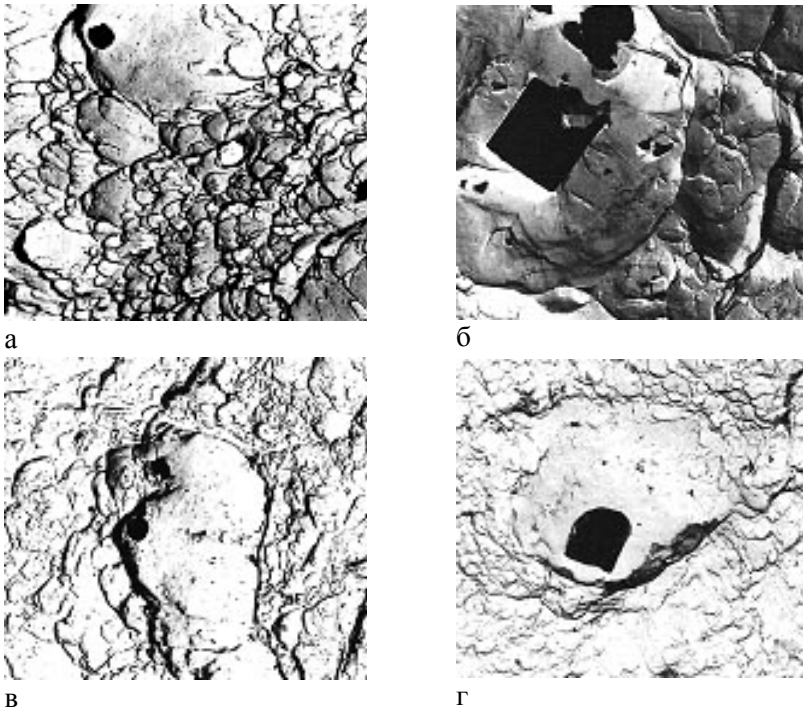


Рисунок 6.36 – Зони локальної пластичної деформації навколо неметалевих вкраплень в сталі 20ХГСЛ (а, б) і 18Х2Н4ВАЛ (в, г)

Радіус зони локальної пластичної деформації визначається за формулою:

$$r_{ул} = \frac{d_{лв} - d_{в}}{2}, \quad (6.9)$$

де $d_{лв}$ – діаметр зони пластичної деформації навколо вкраплення;
 $d_{в}$ – діаметр вкраплення.

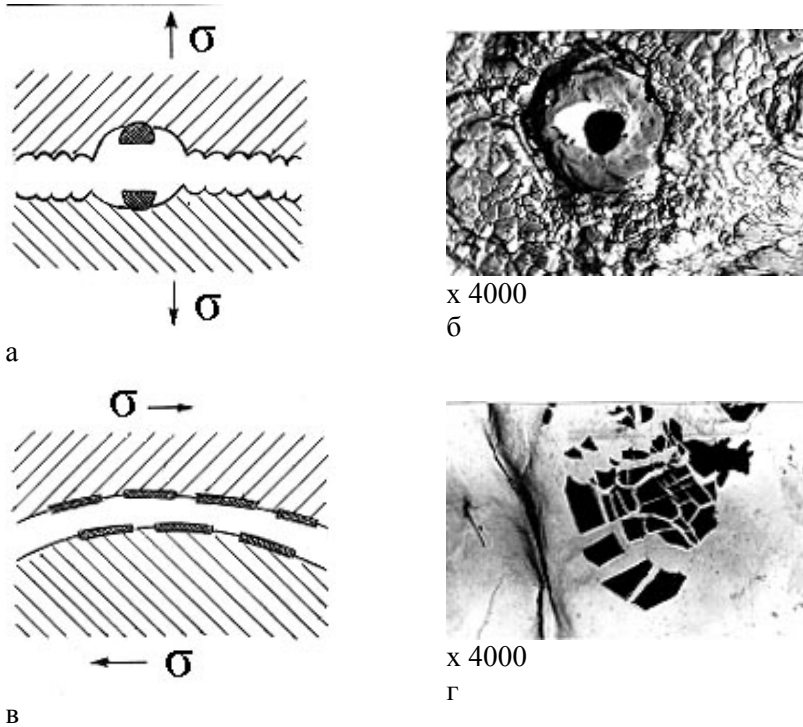


Рисунок 6.37 – Схема руйнації металу навколо неметалевих вкраплень

В другому випадку переважають дотичні напруження. Розташоване на межах зерен вкраплення руйнується за рахунок зсуву окремих зерен (рис. 6.37, в). Мікрофрактограма зламу має вигляд, наведений на рисунку 6.37, г. В цьому випадку радіус зони локальної пластичної деформації визначається за формулою:

$$r_{ул} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n}, \quad (6.10)$$

де a_1, a_2, a_n – відстань між фрагментами зруйнованого вкраплення;
 n – кількість фрагментів вкраплення.

Рівняння для визначення зони локальної пластичної деформації виведене стосовно до зразків спеціальної форми (див. рис. 3.9), що випробовуються на згин або позацентрове розтягнення в умовах плос-

конапруженого стану. При випробуваннях на ударний згин стандартних зразків виникає багатовісний напружений стан. Але цей стан виникає на ділянці максимально навантаженої зони за рахунок надрізу. В центрі пересічення зразку спостерігається зона з невеликою деформацією. Тому з певним наближенням можна рахувати, що руйнація металу в цій зоні відбувається в умовах, що є наближеними до плосконапруженого стану.

Якщо визначити радіус зони локальної пластичної деформації навколо неметалевого вкраплення, можна вивести формулу для визначення локального коефіцієнта концентрації напружень, $K_{1л}$, в металевій матриці, що безпосередньо оточує неметалеве вкраплення:

$$K_{1л} = \frac{r_{ул} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \sigma_{0,2}^2}{(1 - 2 \cdot \mu)^2}, \quad (6.11)$$

де $K_{1л}$ – локальний коефіцієнт інтенсивності напружень;

$r_{ул}$ – радіус локальної зони пластичної деформації навколо неметалевого вкраплення.

На величину коефіцієнта інтенсивності напружень суттєво впливає гострота надрізу: в'язкість руйнації зменшується зі зменшенням радіусу надрізу, ρ , відповідно залежності $1/\sqrt{\rho}$ до досягнення певного межового значення, що дорівнює 0,006 мм та відповідає розмірам багатьох ендогенних вкраплень. Для більш крупних вкраплень рівняння для визначення $K_{1л}$ має такий вигляд:

$$K_{1л} = \left(\frac{r_{ул} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \sigma_{0,2}^2}{(1 - 2 \cdot \mu)^2 \cdot K_{\rho}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (6.12)$$

де K_{ρ} – коефіцієнт, що враховує радіус неметалевого вкраплення.

В якості прикладу наведемо розрахункові значення локальних коефіцієнтів концентрації напружень безпосередньо біля неметалевих вкраплень (таблиця 6.3).

З цієї таблиці можна зробити висновок, що значення локального коефіцієнту в'язкості руйнації суттєво розрізняються відповідно виду зламу і можуть характеризувати властивості металевій матриці біля неметалевих вкраплень.

Таблиця 6.3 – Розрахункові значення $K_{1л}$ металевої матриці поблизу неметалевих вкраплень

Марка сталі	Вид зламу	Розміри, м		Локальний коефіцієнт в'язкості руйнації, $K_{1л}$, МПа·√м
		неметалевого вкраплення	зони локальної пластичної деформації	
20ХГСЛ	крихкий внутризеренний	$4,8 \cdot 10^{-7}$	$9,1 \cdot 10^{-7}$	2,83
	в'язкий внутризеренний	$7,1 \cdot 10^{-7}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	4,62
12Х2Н4ВА	крихкий міжзеренний	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	3,73
	в'язкий внутризеренний	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$3,9 \cdot 10^{-6}$	9,33

Таким чином, негативний вплив неметалевих вкраплень пояснюється не простим ослабленням пересічення металевого виробу або зразку, а створенням напруженого стану навколо вкраплень. Доказом цього є результати механічних випробувань зразків сталі з заданою анізотропією структури, в якій вміст неметалевих вкраплень досягає одиниць і десятків відсотків (рис. 6.38). Такий великий вміст вкраплень суттєво вплинув на статичну міцність. Реальному зниженню статичної міцності відповідає логарифмічна крива, 2, лінійна залежність, 1, відповідає розрахунковій міцності в залежності від зменшення площі пересічення зразків (рис. 6.39).

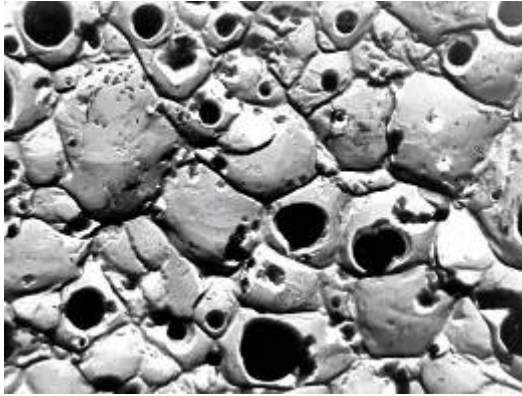


Рисунок 6.38 – Неметалеві вкраплення в зламі сталі ЗАС (×4000)

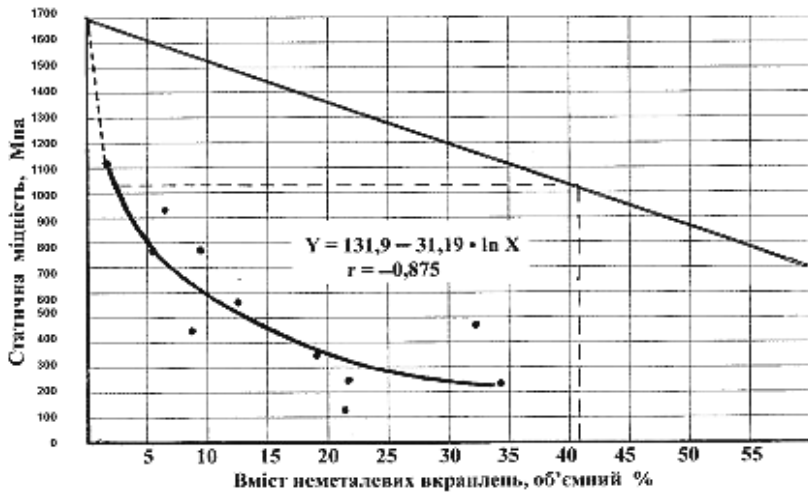


Рисунок 6.39 – Вплив неметалевих вкраплень на статичну міцність сталі ЗАС

7 СИНТЕЗ ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ

В загальному вигляді задача синтезу або створення нового сплаву може бути сформульоване таким чином:

Є періодична система Д.І.Менделєєва і усі необхідні відомості про властивості елементів, у тому числі їх техніко-економічні характеристики.

Умови: сплав, що розробляється повинен мати певний комплекс властивостей. Ці властивості розподіляються на такі категорії:

а) головна властивість, котра повинна мати оптимальне значення (міцність, стійкість проти корозії, технологічність, ціна);

б) обмеження, що обумовлюють, що деякі інші властивості повинні бути не менше, або не більше певних значень (ударна в'язкість, концентрації дефіцитних легуючих елементів, токсичність);

в) вимоги до натурних властивостей.

Зазвичай, властивості перших двох категорій визначаються на зразках і технологічних пробах. Але для сучасної техніки такі випробування недостатні. Потрібна перевірка технологічності в реальних виробничих умовах і властивостей в умовах підвищеного навантаження.

Треба: знайти склад сплаву, режими його термічної обробки, що забезпечать виконання усіх перелічених умов.

7.1 Методи синтезу сплавів

Методи, що використовуються для розв'язання задачі синтезу сплавів, можна розподілити на такі групи.

1 Метод проб і помилок. В основу додаються послідовно різні елементи спочатку по одному, потім групами. Вибір легуючих елементів засновано на апріорній інформації. Елементи, що негативно впливають на властивості, відкидаються. При значній кількості легуючих елементів кількість дослідів зростає у величезній ступені, що і обмежує цей метод.

2 Металофізичний метод. Заснований на дослідженні металів засобами теоретичної та експериментальної фізики. Незважаючи на очікувану перспективність, металофізичні методи, поки що, не дають конкретних результатів. Корисними зараз є лише окремі положення.

3 Статистичні методи. Це пасивні дослідження, засновані на об-

робці виробничого досвіду. Невелика розбіжність коливань складу сплавів у промислових умовах і неможливість введення в останні нових компонентів не дає можливості створення цим методом нових сплавів.

4 Системний підхід. Сукупність взаємодій усіх можливих комбінацій елементів в усіх можливих комбінаціях із заданою основою можна розглядати як систему. Послідовний перебір усіх цих комбінацій з елементами системи практично неможливий (для 80 елементів періодичної системи – $1,2 \cdot 10^{24}$ комбінацій). Можна використати так званий метод редукції: розділити загальну складну систему системного аналізу на декілька більш простих, що можна розв'язувати поодиноці, кожну найбільш задовільним методом. Підсумок дає розв'язання всієї задачі.

Задача синтезу сплавів підрозділяється на такі підзадачі:

- формулювання завдання на сплав;
- вибір основи сплаву;
- вибір рядів легуючих елементів і шкідливих домішок, заснований на парних взаємодіях основи і решти елементів періодичної системи. Відсів їх за економічними показниками. Оцінка впливу домішок і додатків на технологічні властивості сплавів;
- вибір легуючого комплексу – групи легуючих елементів, що повинні вводитися в сплав сумісно;
- вибір складу сплаву. На цьому етапі вирішується вибір такого конкретного вмісту кожного легуючого елементу комплексу, що забезпечує найбільш можливий рівень основної властивості.

7.2 Класифікація сплавів

Кількість різних вимог до матеріалів, що потребує сучасна техніка, досить велика. Сплави з цієї точки зору можна класифікувати таким чином.

1 Конструкційні сплави, від яких вимагається тільки певний рівень механічних властивостей в умовах нормальних температур та звичайних середовищ. До конструкційних сплавів відносяться сплави, що використовуються у транспортних пристроях, від яких, крім механічних властивостей вимагається зменшена маса.

2 Спеціальні сплави, від яких крім певних механічних властивостей вимагається спроможність протистояти руйнації в спеціальних

умовах навантаження та спеціальних середовищах. Спеціальні сплави підрозділяються на такі підгрупи.

2.1 Для роботи в умовах високих температур.

2.2 Для роботи в умовах низьких температур.

2.3 Для роботи в різних агресивних середовищах

2.4 Сплави, стійкі проти абразивного зношування.

3 Сплави, що задовольняють тільки специфічним комплексам вимог. Вони, в свою чергу, підрозділяються на підгрупи.

3.1 Інструментальні.

3.2 Кулькопідшипникові.

3.3 Антифрикційні.

3.6 Легкоплавкі.

3.7 Демпфуючі.

3.8 Для роботи в умовах глибокого вакууму (в тому числі в умовах космосу).

4 Особливі сплави, від яких в першу чергу вимагаються певні фізичні або інші властивості, що не пов'язані із спроможністю протистояти руйнації. До особливих сплавів відносяться такі підгрупи.

4.1 Провідникові (звичайні провідники, напівпровідники, надпровідники, сплави, що мають великий електричний опір).

4.2 Магнітні (магнітожорсткі).

4.3 Сплави з високою теплопровідністю.

4.4 Сплави з особливими коефіцієнтами теплового розширення.

4.5 Сплави з особливими оптичними властивостями (висока спроможність до віддзеркалювання, ювелірні).

4.6 Сплави з високою біологічною сумісністю.

4.7 Сплави для атомної техніки, що володіють особливою взаємодією з жорстким іонізуючим випромінюванням.

4.8 Сплави-каталізатори.

7.3 Вибір основи сплаву

Основи сплавів для багаточисельних технічних призначень закріплені традиціями та їх вибір, взагалі, не часто є предметом серйозного обговорення. Але це не завжди є тривіальним завданням.

Вибір основи – це компроміс між бажанням забезпечити високий рівень головної властивості та досягненням цього при мінімальних затратах.

Для вибору основи важливими є залежності "номер елемента – властивості", що узгоджуються з періодичним законом Д.І. Менделєєва. Деякі фізичні властивості: атомний об'єм, густина, температура плавлення пов'язані з атомними номерами чіткими періодичними залежностями. Але не всі залежності "номер елемента – властивість" є періодичними. Згідно класифікації Б.Б. Гуляєва усі залежності підрозділяються на періодичні та неперіодичні.

Періодичні залежності можна розділити на такі:

- лінійні – у кожному періоді властивості змінюються за лінійним законом таким чином, що загальна залежність утворює "пилку";
- тангенційні – властивості утворюють систему екстремумів, що мають форму тангенсоїд. У кожному періоді може бути від одного до трьох екстремумів, що відносяться до елементів одних і тих самих груп;
- синусоїдальні – властивості утворюють систему синусоїд із платоподібними максимумами. У кожному періоді їх може бути від одного до трьох.

Для основи конструкційних сплавів найважливішою властивістю є міцність.

За міцністю елементи розподіляють на чотири класи (рис. 7.1):

- гази і рідини;
- неміцні елементи, що мають межу міцності меншу, ніж 50 МПа;
- міцні елементи, що мають межу міцності від 50 до 500 МПа;
- високоміцні елементи, що мають межу міцності більшу, ніж 500 МПа.

Пластичність. Найбільш адекватним показником пластичності вважають відносне звуження. Але більшість металів руйнується без утворення шийки. Щоб мати можливість порівняти між собою різні матеріали в якості характеристики пластичності використовується відносне подовження.

Елементи за пластичністю розділяють на чотири класи (рис.7.2).

1 Гази і рідини. Їх пластичність умовно можна рахувати безмежно великою.

2 Високопластичні елементи. Їх подовження при розтягненні сягає або перевищує 40 %.

3 Пластичні елементи. Їх подовження знаходиться в межах від 40 до 3 %. Це – найбільш велика група елементів.

4 Крихкі елементи. Їх подовження менше, ніж 3 %.

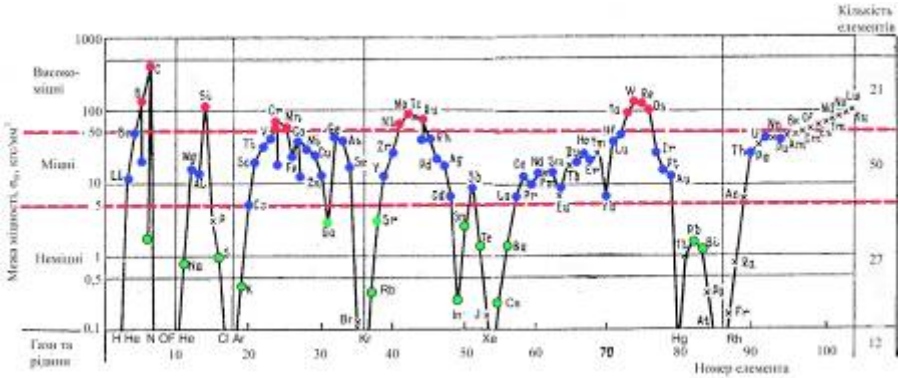


Рисунок 7.1 – Розподіл хімічних елементів за міцністю

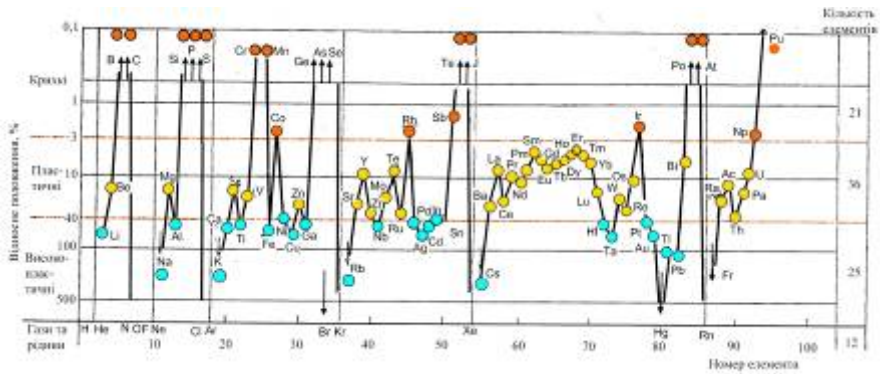


Рисунок 7.2 – Розподіл хімічних елементів за пластичністю

Густина. Елементи за густиною розділяються на 4 класи (рис. 7.3).

1 Гази, їх густина знаходиться в межах від 70 до 2490 кг/м³.

2 Легкі елементи, їх густина не перевищує 5000 кг/м³.

3 Важкі елементи, їх густина знаходиться в межах від 5000 кг/м³ до 10000 кг/м³.

4 Дуже важкі елементи, їх густина перевищує 10000 кг/м³.

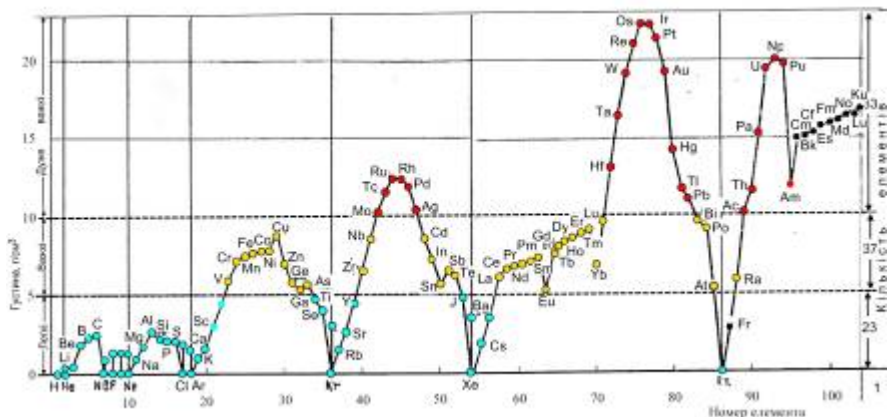


Рисунок 7.3 – Розподіл хімічних елементів за густиною

За температурою плавлення елементи розділяються на чотири класи (рис. 7.4).

1 Гази і рідини. Це 10 неметалів і один метал (ртуть). Найнижчу температуру плавлення має гелій (He). Його температура плавлення дорівнює 1773 K).

2 Легкоплавкі елементи (мають температуру плавлення від 0 до 600°С).

3 Середньоплавкі елементи (температура плавлення від 600 до 1600°С).

4 Тугоплавкі елементи (температура плавлення більша, ніж 1600°С).

Стійкість проти корозії. Це – складна характеристика матеріалів. В якості одиниці для порівняння різних елементів за їх стійкістю проти корозії прийнята величина зменшення маси зразку, що має площину 1см² протягом однієї години в азотній кислоті з концентрацією від 30 до 60% при 20°С. За цим показником елементи розділяють на шість класів (рис. 7.5).

1 Гази, їх стійкість проти корозії мінімальна (10 одиниць).

2 Нестійкі елементи (від 1 до 10⁻¹ одиниць).

3 Малостійкі (від 10⁻¹ до 10⁻² одиниць).

4 Відносно стійкі (від 10⁻² до 10⁻³ одиниць).

5 Стійкі (від 10⁻³ до 10⁻⁴ одиниць).

6 Дуже стійкі (більше 10⁻⁴ одиниць).

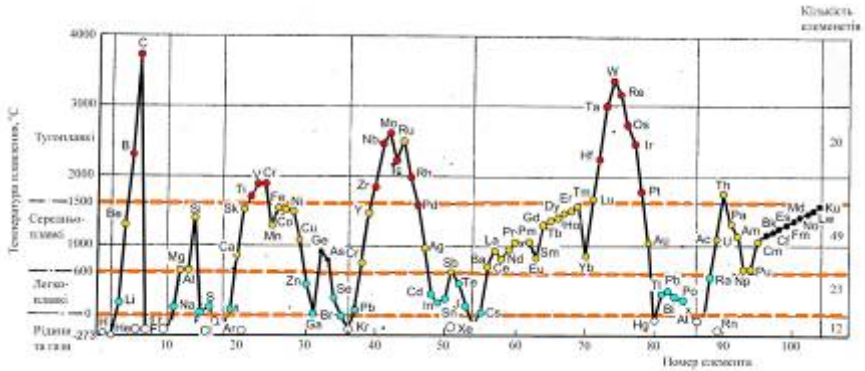


Рисунок 7.4 – Розподіл хімічних елементів за температурою плавлення

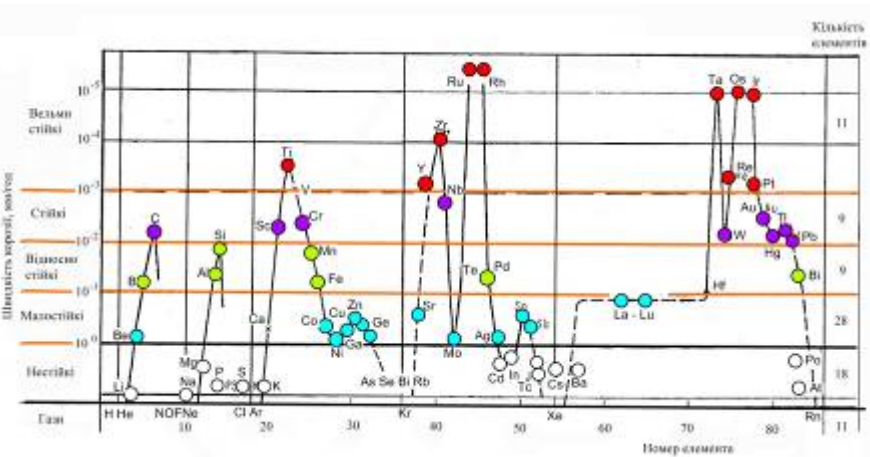


Рисунок 7.5 – Розподіл хімічних елементів за стійкістю проти корозії

Взагалі, для кожного елемента існує, так звана, провідна властивість. Розподіл елементів за провідними властивостями наведено на рисунку 7.6.

Якщо треба вибрати основу для конструкційного сплаву, повинно бути задано, щонайменше, такі умови:

- межа міцності;
- відносне подовження;
- додаткові умови;
- ціна (цей показник має наблизитися до мінімуму).

Метали (82 елементи)														Неметали (22 елементи)																							
														H	Газоподібні (11 елементів)										He												
Легкі, $\rho < 5 \text{ г/см}^3$ (16 елементів)														Li	Be	B	C	N	O	F	Ne																
														Na	Mg	Al	Тверді (11 ел.)				Cl	Ar															
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr																				
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe																				
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																				
Fr	Ra	Ac	Тугоплавкі $t > 1600 \text{ }^\circ\text{C}$ (11 елементів)				Важкі, $\rho > 5 \text{ г/см}^3$ (13 елементів)				Легкоплавкі, $t_p < 600 \text{ }^\circ\text{C}$ (12 елементів)																										
																		Лантаноїди і актиноїди (30 елементів)																			
																		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu						
																		Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr						

Рисунок 7.6 - Розподіл хімічних елементів за провідною властивістю як основи сплавів

Вибір основи конструкційного сплаву розглянемо на конкретному прикладі. Треба вибрати основу для конструкційного сплаву за такими умовами:

- межа міцності, $\sigma_B \geq 100 \text{ МПа}$;
- $\delta \geq 50 \%$;
- ціна мінімальна.

За міцністю треба вибрати елемент з третього класу. Умовам міцності з цього класу відповідають чотири елементи: алюміній, залізо, титан та мідь.

За пластичністю вибираємо елементи з другого класу. З урахуванням міцності вимогам щодо пластичності задовольняють ті ж самі чотири елементи. Але треба врахувати ще вартість або ціну елементів. Орієнтовано вартість (ціна) елементів наведена в таблиці 7.1. З урахуванням ціни, для основи сплаву безумовно треба вибрати залізо. Але це є найпростіший випадок.

При виборі основи для транспортних пристроїв треба враховувати, що ці пристрої, крім корисного навантаження, переміщують у просторі і власну конструкцію. Виходячи з цього, деталі та вузли більшості транспортних пристроїв мають бути, по можливості, найлегшими.

Таблиця 7.1 – Ціна хімічних елементів

Елемент	Ціна елемента, у. о.	Елемент	Ціна елемента, у. о.
Азот	0,111	Магній	1,63
Алюміній	1,35	Марганець	2,65
Аргон	1,929	Мідь	1,78
Барій	51,42	Молибден	41,134
Берилій	449,55	Арсен	28,39
Бор	182,11	Натрій	1,93
Бром	2,51	Неодим	396,42
Ванадій	128,52	Неон	69,86
Вісмут	36,42	Нікель	8,67
Водень	4,79	Ніобій	139,27
Вуглець	0,0432	Олово	22,07
Вольфрам	32,64	Празеодим	492,84
Гадоліній	3214,35	Реній	2241,4
Галій	803,56	Ртуть	43,17
Гафній	2839,27	Самарій	428,57
Гелій	119,98	Свинець	1,43
Германій	1285,7	Селен	40,71
Гольмій	3857,14	Сірка	0,13
Диспрозій	1285,71	Скандій	6428,7
Європій	6428,56	Стронцій	64,27
Залізо	0,2835	Сурма	4,92
Індій	642,85	Талій	214,2
Ітербій	2571,43	Тантал	792,85
Ітрій	642,85	Телур	53,56
Йод	20,77	Тербій	749,9
Кадмій	21,42	Титан	4,6
Калій	4,92	Торій	214,2
Кальцій	7,27	Тулій	20357,13
Кисень	0,216	Фосфор	3,21
Кобальт	34,425	Фтор	2,15
Кремній	1,06	Хлор	0,15
Криптон	629,991	Хром	3,59
Ксенон	914,89	Церій	102,76
Лантан	164,97	Цинк	1,15
Літій	97,47	Цирконій	52,06
Лютецій	22499,99	Ербій	1285,71

Вартість деталі може бути розраховано за наступною формулою:

$$h = S \cdot L \cdot \rho \cdot \text{Ц}, \quad (7.1)$$

де S – площа пересічення деталі;

L – довжина навантаженого елемента деталі;

ρ – густина;

Ц – ціна 1 кг основи сплаву.

Коли замінити S відношенням навантаження до межі міцності, отримаємо:

$$h = \frac{P \cdot L \cdot \rho \cdot \text{Ц}}{\sigma_T}, \quad (7.2)$$

При виборі основи треба порівняти вартість виготовлення деталі із деякого матеріалу, що приймається за еталон, та іншого, більш легкого, але і більш коштовного. Еталон позначається індексом e . Коли ми використовуємо більш коштовний матеріал, вартість деталі підвищується на Δh .

$$\Delta h = P \cdot L \cdot \left[\left(\frac{\rho \cdot \text{Ц}}{\sigma_T} \right) - \left(\frac{\rho_e \cdot \text{Ц}_e}{\sigma_{Te}} \right) \right], \quad (7.3)$$

Якщо вартість перевезення 1 кг корисного вантажу дорівнює C , заміна еталонного сплаву більш легким дозволить перевезти додатковий вантаж, що скоротить вартість транспортування на Δd .

$$\Delta d = P \cdot L \cdot \frac{\rho_e / \sigma_{Te}}{\rho / \sigma_T} \cdot C, \quad (7.4)$$

Після деяких математичних перетворювань одержимо наступне відношення:

$$\frac{\Delta h}{\Delta d} = \frac{\left(\frac{\sigma_{Te} \cdot \rho \cdot \text{Ц} - \sigma_T \cdot \rho_e \cdot \text{Ц}_e}{\sigma_T \cdot \rho_e - \sigma_e \cdot \rho} \right)}{C}, \quad (7.5)$$

Позначимо вираз у дужках, як F .

Тоді умовою економічності заміни еталону більш легким сплавом буде:

$$F/C < 1, \quad (7.6)$$

де C – залежить від типу транспортного засобу;

F – залежить від властивостей сплаву.

Розрахунки краще представити у вигляді таблиці 7.2, де порівняємо залізо, алюміній, титан та берилій в якості основи сплавів для деталей транспортних засобів.

Таблиця 7.2 – Вибір основи сплавів для транспортних пристроїв

Основа	Fe	Ti	Al	Be
Густина, кг/м ³	7,86	2,7	4,5	1,8
Межа текучості, МПа	200	80	300	500
Ціна, ум. одиниць	0,2	0,63	2,15	210
F	1	2,4	1,1	24,5
F/C ($C = 5$)	–	0,48	0,22	4,9
F/C ($C = 10$)	–	0,24	0,11	2,45
F/C ($C = 100$)	–	0,024	0,011	0,24

$F/C = 1$ відповідає нерухомому пристрою, для якого заміна заліза іншою основою не має сенсу.

Величини F/C , що дорівнюють 5, 10 та 100 відповідають взагалі наземному транспорту, авіаційному та космічному відповідно. Заміна залізних сплавів сплавами на основі алюмінію виправдана для автомобілів, використання титану – у літаках (рис.7.7), берилію – в космічних апаратах. Відомо, що космічний корабель для посадки на поверхню Місяця було зроблено зі сплаву на основі берилію (рис.7.8).

Вибір основи жароміцних сплавів. Жароміцними вважаються сплави, що працюють при температурі від 800 до 1750 °С. Робоча температура жароміцних сплавів дорівнює 0,6 від температури плавлення, або температура плавлення складає 1,65 робочої температури. Для заданого діапазону робочих температур температури плавлення металів основи повинні складати 1320 – 2887 °С.



Рисунок 7.7 – Надзвуковий літак, виготовлений зі сплаву на основі титану

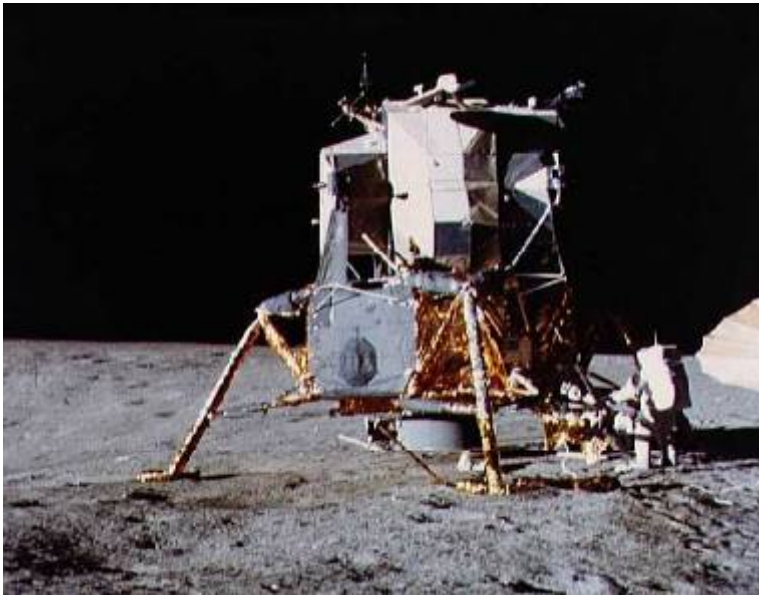


Рисунок 7.8 – Посадочний модуль космічного корабля Аполон, виготовлений зі сплаву на основі берилію, на поверхні Місяця

Цій температурі відповідають 34 елементи. Треба одразу відкинути дуже дорогі елементи платинової групи, лантаноїди, актиноїди, штучні елементи. Залишається 18 елементів, що за робочою температурою розділяються на чотири групи.

Перша група – $t_{\text{ПЛ}} = 1320\text{--}1600^\circ\text{C}$, $t_{\text{РОБ}} = 800^\circ\text{C}$. До неї належать Ni, Si, Fe, Sk, Co, V.

Друга група – $t_{\text{ПЛ}} = 1600\text{--}2000^\circ\text{C}$, $t_{\text{РОБ}} = 1000^\circ\text{C}$. До неї належать Ti, Zr, Cr.

Третя група – $t_{\text{ПЛ}} = 2000\text{--}3000^\circ\text{C}$, $t_{\text{РОБ}} = 1000^\circ\text{C}$. До неї належать Nb, Hf, W.

Четверта група – $t_{\text{ПЛ}} > 3000^\circ\text{C}$, $t_{\text{РОБ}} = 1750^\circ\text{C}$. До цієї групи належать Re, W, C, Ta, Mo.

Серед цих елементів є дорогі, використання яких є економічно недоцільним (Re, Sc, Hf, Y), дуже крихкі (B, C) і такі, що легко окислюються при підвищених температурах (Ti, Fe, W, Mo). Залишаються два елементи – нікель і кобальт, що найчастіше використовуються в промисловості як основи жароміцних сплавів. W, Mo, Nb використовуються в якості арматури в жароміцних композитних ливарних сплавах, де вони захищені від окислення матрицею на основі нікелю.

7.4. Основи легування сплавів.

Розчинення будь-якого елемента в основі завжди підвищує характеристики міцності: тимчасовий опір, межу текучості та пропорційності. Залежність міцності від концентрації легуючого елемента є нелінійною (рис.7.9).

Важливі два показники: σ_B за умов нульової концентрації легуючого елемента і σ_p – міцність на межі розчинності. Напрямок зміни міцності в заевтектичній області залежить від властивостей легуючого компонента і структури евтектики: він може бути і низхідним і східним.

Більш складною є залежність пластичності від легуючого додатка. У більшості випадків при збільшенні концентрації легуючого додатка пластичність круто падає (δ_1), в інших випадках падіння є не таким крутим (δ_2), у деяких випадках пластичність, навіть, дещо зростає (δ_3). Пластичність сплаву залежить від двох критеріїв: найбільшої (граничної) розчинності α і критерію розподілення:

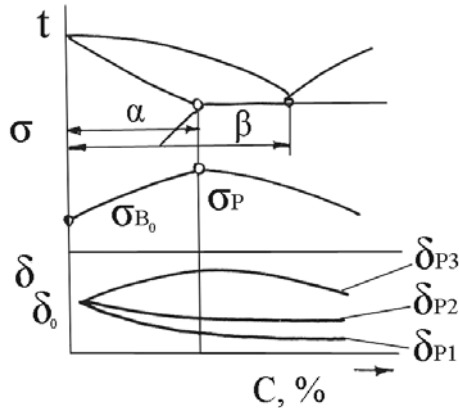


Рисунок 7.9 – Вплив концентрації легуючого елемента на міцність і пластичність сплаву

$$K_0(\omega) = \alpha / \beta, \quad (7.7)$$

де α – критерій розчинності – гранична розчинність елемента у твердій фазі при температурі евтектики, перитектики або монотектики;

β – критерій поєднання – відповідає граничній розчинності елемента у рідкій фазі основи.

Критерій $K_0(\omega)$ визначає характер розподілення хімічного елемента в основі. Чим менше ω , тим більшою є схильність елемента концентруватися на межах зерен. При $\omega = 1$ легуючий елемент розподілений у сплаві рівномірно. При $\omega \rightarrow 0$ концентрація елемента на межах зерен буде швидко збільшуватись. Тому при $\omega < 0,01$ елемент є шкідливою домішкою.

Такі елементи круто знижують пластичність, а за умов підвищених концентрацій – і міцність. При $\omega \geq 0,1$ пластичність зберігає значення, що наближується до пластичності основи. При подальшому збільшенні розчинності елемента пластичність починає знижуватись.

Дуже цікавим є поєднання великого (близького до 1) ω з невеликим значенням α (десяті долі відсотка). При цьому пластичність основи зростає. Але така комбінація зустрічається порівняно рідко.

В залежності від критеріїв α і ω легуючі елементи розділяють на чотири розряди.

1 Основні легуючі елементи. $\alpha \geq 1\%$ і ω обмежується межевою величиною $\omega_{кр}$, при значенні нижче за яку елементи є шкідливими домішками. Це елементи - головні зміцнювачі та їх можна вводити в основу поодинці.

2 Допоміжні легуючі елементи. $0,01\% \leq \alpha \leq 1\%$, ω також обмежується $\omega_{кр}$. Це елементи, що підвищують пластичність (пластифікатори, модифікатори).

3 Шкідливі домішки. Елементи, що розташовані нижче значень $\omega_{кр}$ при будь-якій, але не дуже малій розчинності.

4 Малорозчинні домішки. $\alpha \leq 0,01\%$. Реального впливу на механічні властивості не мають.

Легування є економічно доцільним, коли деталь стає дешевшою у порівнянні з деяким збільшенням вартості в зв'язку із застосуванням легуючого елемента. Коли позначити вартість деталі з чистого елемента - основи H_0 , а з легуючим додатком H_D , тоді критерій доцільності легування:

$$\varepsilon = \frac{H_D}{H_0}, \quad (7.8)$$

Легування є економічно доцільним у випадку, коли $\varepsilon < 1$.

7.5 Зміцнення ливарних сплавів шляхом термічної обробки

Обов'язковою умовою зміцнюючої термічної обробки є суттєва зміна розчинності зміцнюючої фази при зниженні температури. Значна зміна розчинності в твердому стані при зниженні температури зустрічається порівняно рідко. Ефективність термічної обробки у випадку гартування і старіння можна оцінити за допомогою критерію $\gamma = ab/cd$. Цей критерій визначається за діаграмою стану (рис. 7.10), він зветься критерієм термічної обробки.

При визначенні легуючих елементів, дія яких на основу здійснюється через термічну обробку, необхідно враховувати область, в якій відбувається викривлення межі розчинності в первинному розчині. Коли викривлення відбувається за низьких температур (200–300 °С, або нижчих) відповідний легуючий елемент є недоцільним.

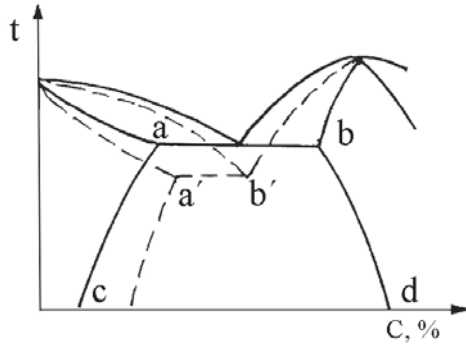


Рисунок 7.10 – Визначення критерію термічної обробки на діаграмі стану

7.6 Модифікування ливарних сплавів

Модифікатори – це речовини, що у дуже малій кількості суттєво впливають на процеси кристалізації з розчинів або розплавів. Властивості сучасних ливарних сплавів в значному ступені зобов'язані ефективним методам модифікування.

Згідно теорії академіка П.А. Ребіндера метали і сплави розглядають як пов'язано-дисперсні системи. На початку процесу кристалізації сплав уявляє собою систему з дуже малих кристаликів - зародків, що утворюють дисперсну фазу і є відносно рівномірно розподіленими в рідкому розплаві (дисперсійному середовищі). При кристалізації зародки збільшуються до певних розмірів, зрощуються один з одним і утворюють полікристалічний агрегат. Розміри, форма, а також умови зрощування окремих кристалів суттєво впливають на формування фізико-механічних і фізико-хімічних властивостей ливарних сплавів.

За характером дії на сплави модифікатори розділяють на модифікатори першого роду – поверхнево-активні речовини, дія яких полягає у вибірковій адсорбції на поверхні кристалів; і модифікатори другого роду – дуже дрібні тверді частинки, що утворюють в розплаві штучні зародки і знижують роботу утворення кристалів. І в першому і в другому випадку обмежується зростання кристалів і подрібнюється макро- і мікроструктура сплавів, тобто сплави зміцнюються на першому і другому ієрархічному рівні.

Для модифікування ливарних сплавів використовують поверхнево-активні метали, що в рідкому стані на межі з повітрям мають відносно низьку вільну поверхневу енергію.

Поверхнева активність металу як модифікатора визначається його здібністю адсорбуватися по межі розплав – кристал і характеризується величиною зниження поверхневої енергії на цій межі.

Поверхнева активність модифікатора може бути визначено за зміною його поверхневого натягу. При цьому розплавлений сплав повинен мати більш високий поверхневий натяг у порівнянні з поверхневим натягом розплавленого модифікатора.

Поверхневий натяг є основою молекулярної характеристики металеві рідини. Атоми або молекули в рідині на певних відстанях володіють взаємним тяжінням. Всередині рідини молекули знаходяться в рівновазі. Силоне поле зовнішніх молекул, що розташовані в поверхневому шарі, не є врівноваженим, що викликає залишок вільної енергії на межі розділу двох фаз. Цей залишок поверхневої енергії, що викликано некомпенсованістю міжмолекулярних зв'язків, дорівнює роботі ізотермічного і оборотного утворення одиниці поверхні, він може бути визначений у формі питомої вільної поверхневої енергії, σ_{1-2} :

$$\sigma_{1-2} = \frac{f_S - f_V}{S_{1-2}}, \quad (7.9)$$

де f_S – вільна поверхнева енергія молекул у поверхневому шарі;

f_V – їх енергія в об'ємних частинах системи;

S_{1-2} – площа поверхні розподілу.

Зі збільшенням температури поверхневий натяг зменшується і при температурах кипіння внаслідок повного молекулярного змішування двох фаз дорівнює нулю. Модифікуюча дія додатку або домішки може бути оцінена за зміною поверхневого натягу рідкого сплаву.

Зменшення поверхневого натягу полегшує зародження центрів кристалізації і сприяє подрібненню структури.

Поверхневий натяг є пов'язаним з температурою кипіння розплаву. Для чистих елементів зв'язку температури кипіння елементів і поверхневого натягу відповідає таке рівняння лінійної регресії:

$$\sigma_{1-2} = 0,506 \cdot t_{\text{кип}} - 16,44, \quad r = 0,877 \quad (7.10)$$

де $t_{\text{кип}}$ - температура кипіння елементу.

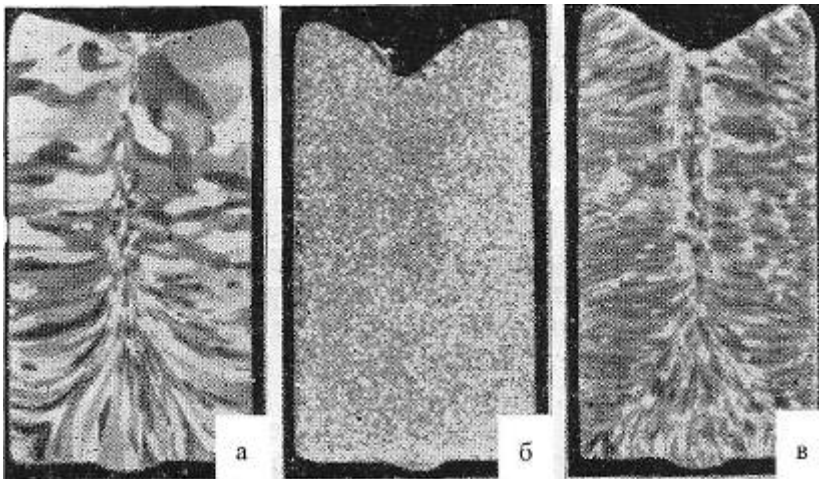
Більш тісна кореляційна залежність існує між сумою температур плавлення і кипіння елементу і поверхневим натягом:

$$\sigma_{1-2} = 0,314 \cdot (t_{\text{кин}} + t_{\text{пл}}) + 62,56, \quad (7.11)$$

де $t_{\text{пл}}$ – температура плавлення елементу.

Використання тих чи інших хімічних елементів у якості модифікаторів залежить від коефіцієнту розподілення їх у певній основі K_0 . Тут можливі два випадки. Коли $K_0 < 1$, то у якості модифікатора є більш ефективною розчинена речовина з меншим коефіцієнтом розподілення. Коли $K_0 > 1$, більш ефективною, як модифікатор, є розчинена речовина з більшим коефіцієнтом розподілу. Зручніше для визначення модифікуючої здібності елементів замість коефіцієнту розподілення, K_0 , використовувати величину $(1 - K_0)$ – ліквацийний коефіцієнт. Тоді, розчинена в основі речовина з більшим ліквацийним коефіцієнтом є більш ефективною в якості модифікатора – подрібнювача зерна.

Для сплавів на основі алюмінію досить великі ліквацийні коефіцієнти мають титан і бор. На рисунку 7.11 наведено вплив титану і бору на литу структуру алюмінію.



а – чистий Al; б – Al + 0,1% Ti; в – Al + 0,1% B

Рисунок 7.11 – Вплив титану і бору на литу структуру алюмінію

7.7 Прогнозування доцільності розробки нових або удосконалення існуючих ливарних сплавів

Вартість металевих виробів в значній ступені визначається їх металоємністю. Зменшити металоємність можна за рахунок створення нових або удосконалення існуючих ливарних сплавів, якісні показники яких повинні бути кращими у порівнянні з традиційними. Розробка нового або удосконалення існуючого ливарного сплаву закінчується дослідними плавками і відповідними випробуваннями, що дозволяють кількісно оцінити досягнуті показники якості. Але доцільним є можливість попередньої оцінки розробленого сплаву у порівнянні з існуючими сплавами, що традиційно використовуються для виготовлення певних металевих виробів. Це можна здійснити за допомогою методів прогнозування.

Ливарні сплави – це технічні об’єкти, комплекс властивостей яких може бути досить точно оцінений кількісно за допомогою відповідних випробувань і досліджень. Тому до сплавів можна застосувати методи прогнозування розвитку техніки за числовими параметрами, розроблені В.Г. Гмошинським і Г.І. Флорентом.

Цими авторами запропоновано спеціальні критерії, K_1 , що характеризує об’єкт, що прогнозується, у порівнянні з існуючими.

Щодо якості ливарних сплавів, що розробляються, критерій K_1 характеризує якість розробленого сплаву у порівнянні з існуючим, що відповідає вимогам стандартів і технічним умовам. Цей сплав вважається еталонним. Формула для визначення цього критерію має наступний вигляд:

$$K_1 = \sum_{i=1}^{i=s} = \frac{K_n \cdot \varphi(i)}{\sum_{i=1}^{i=s} \varphi(i)}, \quad (7.12)$$

де $\varphi(i)$ – функція, що нормує вагу відносних параметрів, що входять в ранжировану послідовність. Загальна кількість таких параметрів – 7 і не повинна перевищувати 10. Для визначення ваги параметрів прогнозування можна використовувати як математичні методи, так і, так звані, методи експертних оцінок.

Параметри визначаються в наступних двох модифікаціях.

1. Поліпшенню якості сплаву відповідає збільшення чисельних

параметрів. В першу чергу це відноситься до механічних властивостей. Тоді:

$$K_n = P / P_0, \quad (7.13)$$

де P – чисельне значення параметра розробленого або удосконаленого сплаву;

P_0 – чисельна значення параметра еталонного сплаву, призначеного для виготовлення виливку.

2 Поліпшенню якості сплаву відповідає зменшення кількісних параметрів. Це, наприклад, відноситься до корозійної стійкості. Тоді:

$$K_n = P_0 / P \quad (7.14)$$

Коли має місце невизначеність щодо віднесення конкретного параметра до однієї з приведених модифікацій, то ці параметри не слід включати в ранжировану послідовність, що повинна бути гранично ясною без будь-яких невизначеностей.

Найбільш складним при прогнозуванні якості нового чи вдосконаленого сплаву є визначення функції, що формує вагу параметра.

Значення нормуючої функції визначається у передбаченні, що якісний розподіл параметрів за ранжиром відомий. Тоді для визначення нормуючої функції $\varphi(i)$ є такі чотири умови.

1 В ранжированій послідовності параметрів вага першого дорівнює 1 ($\varphi(1) = 1$). Це не виключає можливість мати найбільшу вагу двом, або навіть більше, першим параметрам.

2 При безмежному збільшенні чисельності параметрів вага останнього дорівнює нулю.

3 Числовий ряд, складений зі значень $\varphi(i)$ повинен сходитися.

4 В інтервалі існування $\varphi(i)$ не повинно бути екстремумів.

Якщо ці умови виконуються, нормуюча функція має наступний вигляд:

$$\varphi(i) = \frac{i}{2^{i-1}}. \quad (7.15)$$

Для конструкційних сплавів, призначених для масового виробництва виливків, в ранжированій послідовності доцільно першими двома номерами вважати межу текучості та ціну.

В якості прикладу наведемо прогнозування доцільності заміни

стандартної литої конструкційної сталі 45 сталлю цієї ж марки, але модифікованою лужноземельними і рідкоземельними елементами (табл. 7.3).

Таблиця 7.3 – Прогнозування доцільності заміни стандартної литої сталі 45Л сталлю 45, модифікованою лужноземельними та рідкоземельними елементами

Номер частно-го параметра в ранжированій послідовності	Параметр	Числові значення параметрів		$K_n P/P_0$	Значення нормуючої функції, $\varphi(i)$	Добуток, $\varphi(i) \cdot K_n$	Узагальнений критерій K_1	
		модифікована сталь 45Л	стандартна сталь 45Л					
1	σ_T , МПа	47,7	45,4	1,05	1,0	1,05		
2	Ціна, грн	3405	3300	1,03	1,0	1,03		
3	КСУ, МДж/м ²	7,2	4,0	1,8	0,75	1,35		
4	δ , %	18,7	18,6	$\frac{1,00}{5}$	0,5	0,5		
5	Ψ , %	39,0	34,5	1,13	0,31	0,35		
СУМА						3,56	4,28	1,20

Значення узагальненого критерію K_1 є більшим за 1, таким чином заміна стандартної сталі 45 модифікованою сталлю 45 є доцільною.

7.8 Особливості синтезу окремих ливарних сплавів

Системний підхід до синтезу сплавів дає можливість визначити основні закономірності синтезу ливарних сплавів на конкретних основах. Ці закономірності зручно представити у схематичному вигляді. Розглянемо особливості синтезу ливарних сплавів на найпоширеніших основах.

7.8.1 Сплави на основі заліза

Вибір компонентів для сплавів на основі заліза наведено на рисунку 7.12. В якості основних компонентів можуть бути використані 30 хімічних елементів, але економічно доцільними з них є тільки 10. В якості модифікаторів доцільно використовувати бор, лужноземельні і рідкоземельні метали. Основні шкідливі домішки – це кисень, азот, сірка, фосфор, селен, телур. З цих домішок зазвичай є присутніми в залізі кисень, сірка та фосфор. При створенні сплавів на основі заліза треба ці шкідливі домішки або вилучити або нейтралізувати.

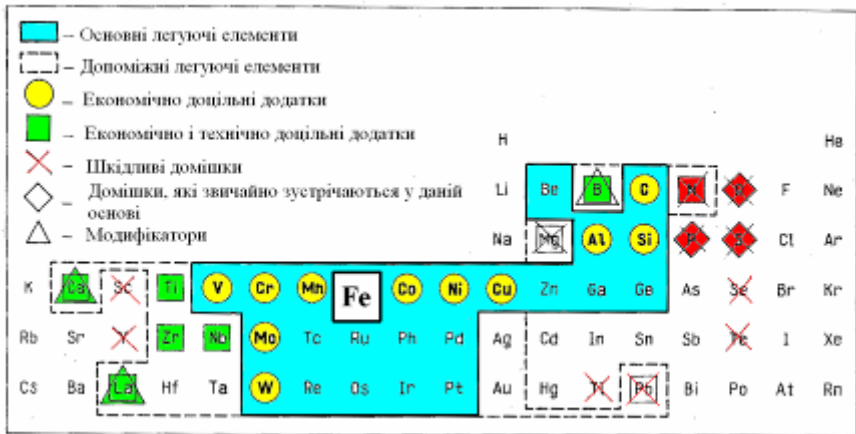


Рисунок 7.12 – Вибір легуючих додатків і визначення шкідливих домішок для сплавів на основі заліза

7.8.2 Сплави на основі алюмінію

Вибір компонентів сплавів на основі алюмінію наведено на рисунку 7.13.

Економічно доцільні легуючі елементи – це кремній, магній, мідь та цинк. Лужні метали натрій і калій в невеликих кількостях є модифікаторами, а в великих – шкідливими домішками.

ЛІТЕРАТУРА

- 1 Золоторевский В.С. Механические свойства металлов [Текст] / В.С.Золоторевский. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
- 2 Жуковец И.И. Механические испытания металлов [Текст] / И.И.Жуковец. – М.: Высшая школа, 1980. – 252 с.
- 3 Бялік О.М. Металознавство [Текст]: підручник / О. М. Бялік, В. С. Черненко, В. М. Писаренко, Ю. Н. Москаленко. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Політехніка, 2006. – 384 с.
- 4 Металловедение и термическая обработка [Текст]. Т. 1. Методы испытаний : справочник / Б.С.Бокштейн, Ю.Т.Векслер, М.И.Виноград и др. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
- 5 Металознавство та термічна обробка металів [Текст] : підручник для студ. вищ. навч. закл. / О. А. Кузін, Р. А. Яцюк. – Л.: Афіша, 2002. – 304 с.
- 6 Фрактография и атлас фрактограмм [Текст] : справочник / под ред. Дж. Феллоуза. – М.: Металлургия, 1982. – 489 с.
- 7 Структурний аналіз металів. Металографія. Фрактографія [Текст] : підручник для студ. машинобудівних спец. / О.М. Бялік, С.Э. Кондратюк, М.В. Кіндрачук, В.С. Черненко ; НТУУ "КПІ". – LinkКиїв : Політехніка, 2006. – 328 с.
- 8 Гуляев А.П. Металловедение [Текст] / А.П.Гуляев. – М.: Металлургия, 1977. – 650 с.
- 9 Статическая прочность и механизм разрушения сталей [Текст] / под ред. В.Даля. – М.: Металлургия, 1988. – 566 с.
- 10 Шульте Ю.А. Электрометаллургия стального литья [Текст] / Ю.А.Шульте. – М.: Металлургия, 1970. – 224 с.
- 11 Хеккель К. Техническое применение механики разрушения [Текст] / К Хеккель; пер. с нем. – М.: Металлургия, 1974. – 64 с.
- 12 Циммерман Р. Металлургия и материаловедение [Текст] : справочник / Р.Циммерман, К. Гюнтер. – М.: Металлургия, 1982. – 480 с.