

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ЗДАТНІСТЬ ДО ЗВАРЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

МТ - Кафедра «Зварювання»

Харків 2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

ЗДАТНІСТЬ ДО ЗВАРЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Затверджено
Редакційно-видавничою
радою НТУ «ХПІ»
протокол №2 від 25.06.2021р

Харків 2021

Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Здатність до зварювання конструкційних матеріалів». /Уклад. С.М. Барташ., - Харків: НТУ «ХП», 2021 – с.

Укладач: С.М. Барташ

Рецензент: проф., докт. техн. наук Пономаренко О.І.

Кафедра зварювання

ВСТУП

В сучасній техніці все більш розширюється номенклатура матеріалів, що використовуються при виготовленні зварних виробів та конструкцій. В свою чергу це зумовлює розвиток нових та вдосконалення існуючих процесів та технологій зварювання, одже різні матеріали, в залежності від їх теплофізичних властивостей, хімічного складу та структурних особливостей неоднаково реагують на процес введення енергії, необхідний для утворення зварного з'єднання. Весь комплекс змін, який відбувається в матеріалі при цьому визначає його спроможність до утворення нероз'ємного зварного з'єднання із забезпеченням деякого заданого рівня службових властивостей і, таким чином, характеризує здатність матеріалу до зварювання.

Лабораторна робота 1

Мікроструктура металу шва та зони термічного впливу при зварюванні низьковуглецевих сталей

Мета роботи – дослідити структуру металу зварного шва та зони термічного впливу для визначення фазового складу, розміру зерен при зварюванні маловуглецевих сталей

Завдання роботи: вивчити вплив термодформаційних та фізико-хімічних процесів, що відбуваються в низьковуглецевих сталях при зварюванні. Застосувати теоретичні положення дисципліни для кількісного і якісного аналізу зварюваності низьковуглецевих сталей.

Устаткування, прилади, матеріали

1. Пост для зварювання
2. Електроди рутилового або фтористо-кальцієвого типу діаметром 4 мм, прожарені протягом 3 год при температурі 250 °С.
3. Пластини з низьковуглецевих сталей 600x200x15 мм - 10 од.
4. Інструменти для зварювання.
5. Слюсарний інструмент для підготовки зразків
6. Обладнання та реактив для підготовки макрошліфів
7. Мікроскоп МІМ- 7М

Теоретичні основи роботи

Ділянка основного металу, яка в процесі зварювання нагрівається до температури, при якій відбуваються структурні зміни, називається зоною термічного впливу або околшовною зоною. Якість зварних з'єднань значною мірою залежить від структури та властивостей околшовної зони. Властивості визначаються початковим складом сплаву і термічним циклом зварювання.

Зона термічного впливу при зварюванні низьковуглецевих сталей може бути охарактеризована діаграмою стану Fe-C і кінетичними залежностями розпаду аустеніту при охолодженні.

Метал одношарового шва має структуру литої сталі. При багатшаровому зварюванні у останньому шарі буде крупнозерниста структура литої сталі, а для попередніх шарів, в зв'язку з термічною дією дуги на метал – структура нормалізованої литої сталі з подрібненими рівноосними зернами фериту та перлиту

Частина основного металу, розташована близько до зварного шва, у процесі зварювання нагрівається до деякої температури, тобто поряд зі зварюванням відбувається процес термічної обробки околшовної зони. Окремі крапки металу околшовної зони в залежності від відстані до шва будуть нагріватися до різних температур. У залежності від температури нагрівання при зварюванні маловуглецевих сталей в околшовній зоні можна спостерігати наступні структурні ділянки:

неповного розплавлення - включає вузьку смужку основного металу, що нагрівається при зварюванні до температур, що лежать між температурою початку і кінця плавлення сталі; у результаті малих розмірів ця ділянка нерозрізнена;

перегріву - включає метал, що нагрівається від температури солідуса до приблизно 1100°C (1373 K); ця ділянка характеризується великим зерном зі структурою перегріву, що знижує в'язкість металу;

нормалізації - охоплює метал, що нагрівається до температур трохи вище критичної крапки A_{c3} (приблизно $900 - 1000^{\circ}\text{C}$); завдяки протіканню процесу перекристалізації і невеликій витримці при підвищеній температурі для цієї ділянки характерно дуже дрібне зерно фериту і перлиту;

неповної перекристалізації - включає метал, що нагрівається до температур від A_{c1} до A_{c3} ; структура даної ділянки дуже своєрідна, поряд зі старими більш великими зернами феррита, що не проходили перекристалізації, утворюються нові значно більш дрібні зерна феррита і перлиту, що пройшли перекристалізацію; завдяки досить різкому розходженню в розмірах зерен ця ділянка має відносно невисокі механічні властивості;

рекристалізації - охоплює метал, що нагрівається від 500 до 725 °С (773-998 К); ця ділянка буде спостерігатися при зварюванні холоднокатаної чи наклепаної сталі; вона характеризується рівноосьними збільшеними зернами ферриту та перліту, причому розмір зерен залежить від ступеня пластичної деформації основного металу;

При зварюванні сталей з підвищеним змістом вуглецю метал шва містить більше перліту, чим при зварюванні маловуглецевих сталей, а в зоні термічного впливу в залежності від умов зварювання можна спостерігати ділянку загартування і ділянку неповного загартування.

У залежності від швидкості охолодження околошовної зони структура ділянки, цю нагрівався до температури вище крапки A_{C3} , може складатися з мартенситу, чи троститу, сорбіту, причому, чим ближче до лінії сплавлення, тим менше дисперсність продуктів розпаду аустеніту.

Механічні якості металу в зоні термічного впливу, за винятком ділянки нормалізації, нижче чим в основному металі до зварювання. Розміри зони термічного впливу залежать від виду і режиму зварювання. Найбільші розміри зона впливу має при газовому зварюванні, а найменші - при зварюванні електродом зі стабілізуючим покриттям і швидкісному автоматичному зварюванні під флюсом.

Якщо зварене з'єднання піддати нормалізації нагрівши до температури ($A_{C3}+30-50^\circ$) і охолодженню на повітрі, то структура металу шва та околошовної зони стає дрібнозернистою з рівноосними зернами ферриту і перліту, в наслідок чого механічні властивості зварного з'єднання зростають.

Методика роботи

1. Зварити зразки з різних марок маловуглецевих сталей (не менш 5-зразків) ручним дуговим зварюванням, заданими електродами.

2. Зі зразків зварних з'єднань приготувати мікрошліфи, для чого виконати попередню обробку. Остаточну обробку мікрошліфа робити пастою. Після остаточної механічної обробки для виявлення мікроструктури застосувати неглибоке травлення, у результаті якого глибина роз'ятреного шару складає не більш 10μ. Для мікротравлення малоуглеродистих сталей у якості травильника використовувати 5 %-й розчин азотної кислоти в етиловому спирті. Протравлений зразок після просушки досліджувати під мікроскопом з метою вивчення структурних складових, недоступних для спостереження неозброєним оком.

Аналіз результатів роботи

1. При обробці експериментальних даних замальовати структуру металу зварних швів і зони термічного впливу для різних марок мало-вуглецевих сталей.

2. Провести аналіз збудованої схеми околошовної зони і схеми Fe-C
3. Проаналізувати результати.

Зміст звіту

Звіт повинен містити: назву та завдання роботи; стислі теоретичні основи роботи; методику роботи; результати роботи та їх аналіз.

Така структура звіту зберігається для всіх подальших лабораторних робіт.

Контрольні питання

1. Охарактеризуйте сталі які відносяться до мало вуглецевих.
2. У чому полягають особливості первинної кристалізації під час зварювання?
3. Наведіть види фазових перетворень у металі в процесі зварювання
4. Що таке схема кристалізації металу зварного шва?
5. Що таке аустеніт, дайте визначення.
6. Що таке перліт, ферит?
7. Який тип кристалічної ґратки у перліту, аустеніту,
8. Що являє собою явище розпаду твердого розчину?
- 9.

Список літератури

1. Теория сварочных процессов /под ред. Фролова –М.: Высш. шк.,1988. -559 с.
2. Багрянский К.В., Добротина З.А., Хренов К.В. Теория сварочных процессов.- К.: Вища школа, 1976. – 424 с.
3. Петров Г.Л., Гумарев А.С. Теория сварочных процессов. – М.:Высшая школа, 1967.-344 с.
4. Грабин В.Ф. Металловедение сварки плавлением. – Киев.: Наукова думка, 1982.- 415 с.
5. Задорожная Л.К.Оценка свариваемости стали ВСтЗсп [текст]/Л.К. Задорожная, В.А. Савченков, В.Л. Кострыкин и др.// Сварочное производство. – 1981. №4. – С.29-30.

Лабораторна робота 2

ВИЗНАЧЕННЯ ФАЗОВОГО СКЛАДУ МЕТАЛУ ЗВАРНИХ ШВІВ

Мета роботи – вивчити вплив термодіформаційних та фізико-хімічних процесів, що відбуваються в низьколегованих матеріалах при зварюванні.

Завдання роботи: Користуючись структурною діаграмою та формулою

для заданого хімічного складу металу зварного шва низьколегованої сталі визначити його фазовий склад в інтервалі температур 600...500⁰С.

Устаткування, прилади, матеріали

1. Мікроскоп МІМ-8
2. Зразки низьколегованих сталей (табл. 2.1)

Таблиця 2.1 Хімічний склад зразків з низьколегованих сталей

Варіант	Хімічний склад металу шва, %							ω _{6/5} град/с
	С	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	
1	0,15	0,5	0,6	0,9	0,5	-	0,01	20
2	0,10	1,5	0,9	1,0	1,0	0,4	0,02	80
3	0,18	0,6	0,3	0,7	0,2	0,2	0,01	60
4	0,11	0,8	0,8	0,6	0,9	0,1	0,01	30
5	0,12	1,2	1,0	0,3	0,2	0,2	0,03	40
6	0,13	1,1	0,9	0,5	0,6	0,4	0,06	90
7	0,14	0,3	0,1	0,3	0,5	0,3	0,02	50
8	0,18	1,7	1,0	1,0	1,2	0,5	0,06	55
9	0,17	1,5	0,4	0,7	1,3	0,3	0,02	75
10	0,16	0,4	0,3	0,5	0,6	0,2	0,01	72
11	0,15	0,6	0,5	0,7	0,3	0,3	0,02	10
12	0,09	0,5	0,4	0,4	0,5	0,2	0,01	80
13	0,20	1,5	0,6	0,3	0,3	0,2	0,04	70
14	0,12	0,6	0,3	0,8	0,6	0,4	0,10	90

Теоретичні основи роботи

Для визначення фазового складу металу зварних швів низьколегованих сталей можна застосовувати діаграму (рис. 2.1), яку побудовано на підставі експериментальних даних.

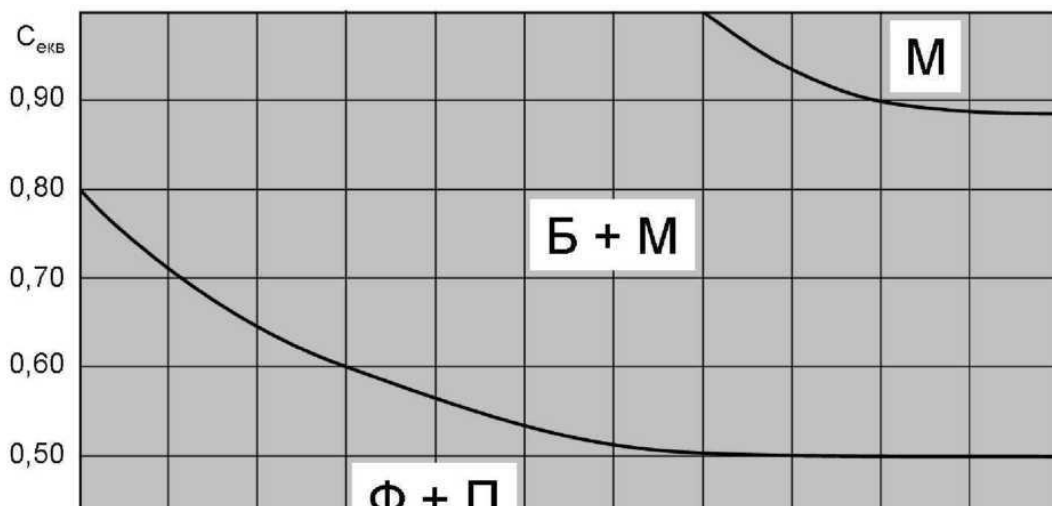


Рис. 2.1. Діаграма для визначення фазового складу металу зварних швів з низьколегованих сталей [1]

По координатних осях діаграми відкладається середня швидкість охолодження металу шва $\omega_{6/5}$ в інтервалі температур 600...500 °С (температурному інтервалі найменшої стабільності аустеніту) і вуглецевий еквівалент, що може бути визначений за формулою:

$$C_{\text{екв}} = C + \text{Si}/7 + \text{Mn}/8 + \text{Cr}/9 + \text{Cu}/10 + \text{Ni}/13 + \text{P}/1,5, \quad (2.1)$$

де C, Si, ... - концентрація відповідних легувальних елементів, %.

Формула (1.1) справедлива в наступних межах легування: 0,09...0,30 % C; 0,07...1,00 % Si; 0,25...2,50 % Mn; до 3,0 % Cr; до 1 % Cu; до 3,0 % Ni; 0,01...0,07 % P; 0,008...0,65 % S.

На діаграмі показано три структурні області: ферито-перлітну, бейніто-мартенситну та мартенситну. Межа між ферито-перлітною та бейніто-мартенситною областями визначається формулою:

$$C_{\text{екв}} = 0,78 - 0,151g \omega_{6/5}.$$

Кількість та форма фериту в області Ф+П визначаються хімічним складом і швидкістю охолодження. За малої швидкості охолодження домінуючою структурою в металі шва є ферит, на тілі якого доволі рівномірно розташовуються зерна перліту. Зі збільшенням швидкості охолодження кількість фериту зменшується. В структурі шва починає переважати перліт, а ферит розташовується у вигляді паралельних смуг, між якими знаходяться великі перлітні області [3]. Зміни хімічного складу впливають на кількість фериту, практично не змінюючи його форму.

В верхній частині діаграми розташовано область бейніто- мартенситної

структури шва, яка крім власне бейнітної та мартенситної фаз містить деяку кількість залишкового аустеніту, зазвичай не більше 3.5 %, що практично не впливає на міцність та пластичність металу шва.

В правому верхньому куті діаграми (рис. 2.1) орієнтовно показано мартенситну область, внаслідок малості якої можна вважати, що при зварюванні низьколегованих сталей метал шва, як правило, має ферито- перлітну або бейніто-мартенситну структуру.

Фазовий склад металу швів високолегованих сталей (переважно хромонікелевих) визначають за діаграмою Шефлера, яку побудовано для зварювальних швидкостей охолодження (див. додаток 1).

Всі легувальні елементи розподілено на аустеніто- та феритоутворювальні. Вздовж вісі абсцис відкладають еквівалент хрому $Cr_{екв}$, що враховує дію всіх феритоутворювальних елементів, а по вісі ординат - еквівалент нікелю $Ni_{екв}$, що враховує вплив аустенітоутворювальних елементів. Для розрахунку $Cr_{екв}$ та $Ni_{екв}$ існують чисельні формули запропоновані різними авторами. Один з найпоширеніших у вітчизняній інженерній практиці варіант розрахунку еквівалентів хрому та нікелю має вигляд:

$$N_{екв} = Ni + 30C + 30N + 0,5Mn + 10B, \quad (2.2)$$

$$Cr_{екв} = Cr + 2Mo + 1,5Si + 5Ti + 2Nb + 2Al + 1,5W + V. \quad (2.3)$$

Тут, як і далі, індекси хімічних елементів позначають їх вміст у відсотках.

Для визначення фазового складу металу шва необхідно за відомим хімічним складом сталі розрахувати $Cr_{екв}$ та $Ni_{екв}$ і з відповідних точок на координатних осях провести перпендикулярні прямі. Точка перетину перпендикулярів вкаже на фазовий склад металу шва.

Показані на діаграмі Шефлера ділянки схильності металу зварних швів певного фазового складу до відповідного виду тріщин або окрихчення вказують на можливі потенційні загрози при зварюванні високолегованих сталей. При зварюванні хромонікелевих високолегованих сталей для попередження гарячих тріщин в швах рекомендується їх двофазний аустеніто-феритний склад із вмістом δ -фериту при бл. 4...8 %.

Нажаль високої точності діаграма Шефлера не забезпечує, так само як і будь-яка інша діаграма, що виходить лише з хімічного складу сталі і не враховує режимів зварювання, форми шва і т. п. Вважається, що середня похибка розрахованого за діаграмою Шефлера фазового складу металу шва складає $\pm 4\%$. Цей факт необхідно враховувати в розрахунках кількості δ -фериту для сталей аустенітного та аустенітно-феритного класу. Для уточненого розрахунку кількості δ -фериту в зварних швах для цієї групи сталей за кордоном використовують діаграми ДеЛонга та WRC-1992 (див. додаток 1). Проте їх застосування для вітчизняних сталей не завжди виправдане внаслідок різних схем легування вітчизняних та закордонних сталей.

Для напівкількісної оцінки фазового складу литого зварного або наплавленого металу для вітчизняних високолегованих сталей можна застосовувати діаграму Потака-Сагалеви́ча (див. додаток 1). Для цієї діаграми вздовж вісі абсцис відкладають хромовий еквівалент феритоутворення $S_{Г_{екв/ф}}$, який враховує вплив (по відношенню до хрому) всіх легувальних елементів на утворення δ -фериту:

$$S_{Г_{екв/ф}} = C_{Г} - 1,5Ni + 2Si - 0,75Mn - K_{ф}(C + N) + Mo + 4Al + 4Ti + 1,5V + 0,5W + 0,9Nb - 0,6Co - 0,5Cu. \quad (2.4)$$

Вздовж вісі ординат відкладають хромовий еквівалент мартенситоутворення $S_{Г_{екв/м}}$, що враховує вплив (також по відношенню до хрому) всіх легувальних елементів на утворення мартенситу:

$$S_{Г_{екв/м}} = 20 - [Cr - 1,5Ni + 0,7 Si + 0,75Mn + K_{м}(C + N) + 0,6Mo + 1,5V + 1,1W + 0,2Co + 0,2Cu + 1,9Ti - 0,1Al]. \quad (2.5)$$

Методика визначення фазового складу металу шва за діаграмою Потака-Сагалеви́ча аналогічна до діаграми Шефлера. Її коректно застосовувати для високолегованих сталей наступного складу: 0,03...0,3% C; 10...22% Cr; $\leq 10\%$ Ni; $\leq 4\%$ Si; $\leq 1\%$ Mn; $\leq 3\%$ Mo; $\leq 3\%$ Al; $\leq 1\%$ Nb; $\leq 1,5\%$ Ti; $\leq 2,5\%$ Cu; $\leq 8\%$ Co; $\leq 2\%$ V; $\leq 1\%$ W.

Методика роботи

Користуючись структурною діаграмою (рис.2.1) та формулою (2.1) для заданого хімічного складу металу зварного шва низьколегованої сталі визначити його фазовий склад в залежності від швидкості охолодження в інтервалі температур 600...500 °С (табл. 2.1)

Аналіз результатів роботи

На підставі одержаних результатів встановити:

1. Який фазовий склад буде у зварному шві даної сталі при заданій швидкості охолодження в інтервалі температур 600...500 °С.
2. Що являє собою явище розпаду твердого розчину

Зміст звіту

Звіт повинен містити: назву та завдання роботи; стислі теоретичні основи роботи; методику роботи; результати роботи та їх аналіз.

Така структура звіту зберігається для всіх подальших лабораторних робіт.

Контрольні питання

1. Наведіть види фазових перетворень у металі в процесі зварювання?
2. У чому полягають особливості первинної кристалізації під час зварювання?
3. Що таке мартенсит у сталях?
4. Наведіть механізм мартенситного перетворення
5. Який тип кристалічної ґратки у мартенситу?
6. Що таке перліт?
7. Що являє собою явище розпаду твердого розчину?
8. Що таке когерентні та некогерентні границі розділу між фазами?

Список літератури

1. Прохоров Н.Н. Физические процессы в металлах при сварке. Т2 – внутренние напряжения, деформации и фазовые превращения. –М.: Металлургия, 1976. – 600 с.
2. Теория сварочных процессов /под. ред.. В.В. Фролова – М.: Высш.шк., 1988. -559 с.
3. Лебедев Б.Д. О характере выделений избыточной фазы в перлитно-ферритных сварных швах [Текст]/Б.Д. Лебедев //Сварочное производство. – 1974.- №1. – С.11-12.

Лабораторна робота 3

Визначення фазового складу металу навколошовної ділянки

Мета роботи: На підставі експериментальних дослідів та побудованих діаграм для низки конструкційних вуглецевих та низьколегованих сталей в залежності від швидкості охолодження, дослідити зміну структурних складових навколо шовної ділянки ЗТВ.

Завдання роботи: Навчитися визначати фазовий склад та структурні складові навколошовної ділянки ЗТВ сталі заданого хімічного складу в залежності від швидкості охолодження.

Устаткування, прилади, матеріали

1. Мікроскоп МІМ-7
2. Зразки з сталі марок приведених у таблиці 3.1

Таблиця 3.1. Варіанти зразків для дослідження

Варіант	Марка сталі	Варіант	Марка сталі
1	35	8	30ХГСА
2	10Г2Б	9	45ХНМТА
3	12ХГСМФ	10	18Х2ВФ
4	15ХГНМ	11	36СГНА
5	25Г2Л	12	20Х2МФ
6	25ХГФА	13	30ХМА
7	45ХМА	14	12ХН2

Теоретичні основи роботи

В зварних з'єднаннях основний метал, який знаходиться в зоні термічного впливу (ЗТВ), в залежності від відстані до лінії сплавлення підпадає під різну теплову дію. В свою чергу це зумовлює різний ступінь структурних, хімічних, механічних та ін. неоднорідностей в різних ділянках ЗТВ. Частина ЗТВ, що під час зварювання нагрівається вище за температуру інтенсивного росту зерна (1000...1100 °С) називається навколошовною ділянкою. Оскільки саме навколошовна ділянка характеризується найбільш різкою та небажаною зміною структури та високим ризиком утворення тріщин, зниження пластичності та ударної в'язкості, то їй, під час вивчення ЗТВ, приділяють найбільшу увагу.

На підставі експериментальних дослідів, для низки конструкційних



вуглецевих та низьколегованих сталей побудовано діаграми, що показують зміну структурних складових навколошовної ділянки ЗТВ в залежності від швидкості охолодження $\omega_{6/5}$ (рис. 3.1, рис. в додатку 2).

Рис.3.1. Діаграма для визначення кількості структурних складових навколо шовної ділянки ЗТВ сталі 35 в залежності від середньої швидкості охолодження в інтервалі 600...500 °C[3]

стосовуючи діаграму (рис. 3.1) від заданої швидкості охолодження $\omega_{6/5}$ необхідно провести перпендикуляр та встановити, через які структурні складові він проходить. Кількість структурних складових визначається шляхом проектування точок перетину перпендикуляра з кривими графіка на вісь ординат.

За відсутності термічної обробки найкраще поєднання механічних властивостей з достатньою опірністю до холодних тріщин досягається при вмісті мартенситу в структурі сталі не вище 30 %.

Для випадків, коли в літературі немає відповідної діаграми для вуглецевої або низьколегованої сталі конкретної марки, яка нас цікавить, можна застосовувати діаграму узагальненого характеру [4]. Цю діаграму (рис. 3.2) побудовано в координатах «вуглецевий еквівалент - швидкість охолодження в інтервалі 600...500 °C». Розрахунок вуглецевого еквіваленту слід здійснювати за формулою:

$$C_{\text{екв}} = C + \text{Si}/24 + \text{Mn}/6 + \text{Ni}/10 + \text{Cr}/5 + \text{Mo}/4 + \text{V}/14. \quad (3.1)$$

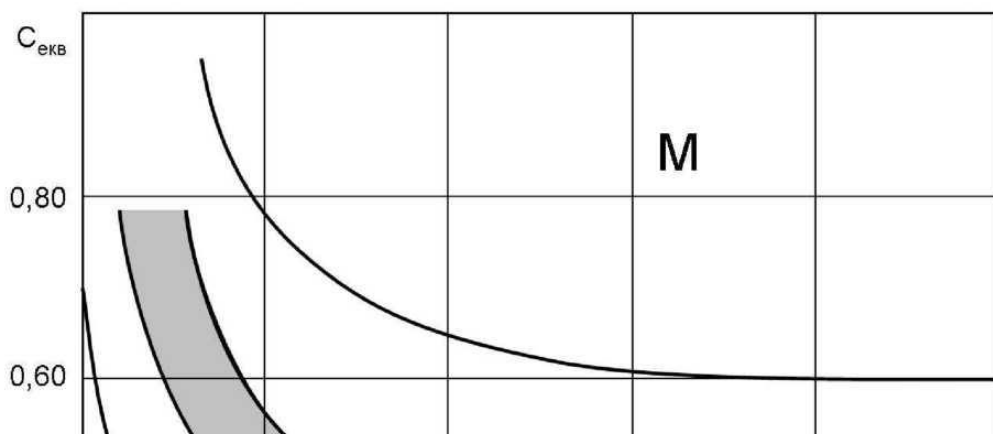


Рис. 3.2. Діаграма для визначення фазового складу навколошовної ділянки ЗТВ вуглецевих та низьколегованих сталей [4]

Діаграму розраховано для наступної концентрації легувальних елементів в сталі, %: $C \leq 0,45$; $Si \leq 1,40$; $Mn \leq 1,80$; $Ni \leq 2,0$; $Cr \leq 2,0$; $Mo \leq 0,40$; $V \leq 0,12$. Слід обережно застосовувати діаграму (рис. 3.2) та формулу (3.1) для сталей з вмістом нікелю більше за 1 %. Цей елемент зсуває область гартування в бік менших температур і таким чином сильно впливає на структуру. Проте, з іншого боку, нікель дуже незначно впливає на характеристики міцності металу.

На діаграмі (рис. 3.2) відокремлені три структурні області: ферито- перлітна Ф+П, область Пр - проміжних фазових перетворень (ферит + перліт + бейніт + мартенсит, ферит+бейніт+мартенсит або бейніт+ мартенсит) та мартенситна М. Оскільки в області Пр завжди присутній мартенсит, то вона розділена на дві ділянки: $M < 50 \%$ та $M > 50 \%$. Межу між цими ділянками показано у вигляді вузької заштрихованої зони, для якої можна вважати вміст мартенситу $M = 50 \%$.

Діаграма (рис. 3.2) дає лише якісне уявлення про структуру навколошовної ділянки, проте її зручно використовувати для розробки технологічних процесів зварювання.

Методика роботи

1. За діаграмою, що показує кількість структурних складових навколошовної ділянки ЗТВ в залежності від швидкості охолодження в інтервалі температур 600.500 °С, визначити фазовий склад навколошовної ділянки для заданої сталі при швидкостях охолодження $\omega_{6/5} = 1; 10; 100$ град/с, зазначивши кількість структурних складових.

Підібрати для заданої марки сталі швидкість охолодження навколошовної ділянки ЗТВ, за якої структура містить $< 30 \%$ мартенситу (інше перліт + бейніт

та ферит), що повинно забезпечувати відсутність холодних тріщин.

2. Користуючись узагальненою діаграмою (рис. 3.2) та формулою (3.1) визначити фазовий склад навколошовної ділянки ЗТВ сталі заданого хімічного складу в залежності від її швидкості охолодження в інтервалі температур 600 . 500 °С.

Назвати одержані структурні складові та вказати кількість мартенситу (більше чи менше за 50 %).

Таблиця 3.2. Варіанти завдань відповідно табл. 3.1

Варіант	Хімічний склад сталі, %							$\omega_{6/5}$, град/с
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	
1	0,25	1,0	0,6	1,2	0,4	0,4	0,08	15
2	0,30	0,6	0,6	0,8	0,6	0,30	0,08	20
3	0,35	0,8	0,8	1,6	1,0	0,35	0,10	40
4	0,40	1,2	0,4	1,0	1,0	0,30	0,09	50
5	0,45	0,9	0,5	0,6	2,0	0,40	0,12	55
6	0,12	0,6	0,5	0,5	1,5	0,10	0,08	5
7	0,14	0,3	0,6	0,2	0,9	0,05	0,10	80
8	0,15	0,2	0,4	0,3	1,0	0,30	0,11	35
9	0,17	1,7	1,2	0,4	0,9	0,20	0,12	10
10	0,20	0,2	0,8	0,3	1,9	0,37	-	90
11	0,08	0,4	0,3	0,2	1,7	0,22	0,12	15
12	0,27	0,6	0,4	1,5	0,6	0,25	0,09	60
13	0,18	0,3	0,3	0,5	1,6	0,15	0,08	45
14	0,32	0,8	0,6	1,0	0,6	0,20	-	65

Аналіз результатів роботи

На підставі одержаних результатів встановити:

1. Як змінюється фазовий склад і кількість структурних складових навколошовної ділянки ЗТВ в залежності від швидкості охолодження.
2. Назвати одержані структурні складові та вказати кількість мартенситу
3. Обґрунтувати вибір швидкості охолодження навколо шовної ділянки ЗТВ для заданої марки сталі

Зміст звіту

Звіт повинен містити: назву та завдання роботи; стислі теоретичні основи роботи; методику роботи; результати роботи та їх аналіз.

Контрольні питання

1. Що являє собою явище розпаду твердого розчину?
2. Що характеризують діаграми анізотермічного розпаду аустеніту?
3. Що можна визначити за допомогою діаграми Шефлера?
4. Який параметр термічного циклу зварювання аустенітно-феритних сталей визначає кількість δ -фериту в зварному шві?
5. Що таке когерентні та некогерентні границі розділу між фазами?

Список літератури

1. Теория сварочных процессов /под. ред.. В.В. Фролова – М.: Высш.шк., 1988. -559 с.
2. Грабин В.Ф. Металоведение сварки плавлением. –К.: Наук. думка, 1982.-416 с.
3. Шоршоров М. Х. Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке [текст] /М. Х. Шоршоров, В.В. Белов. – М.: Наука, 1972. -220 с.
4. Лебедев Б.Д. Диаграмма для определения структуры околошовной зоны углеродистых и низколегированных сталей [Текст]/Б.Д. Лебедев// Сварочное производство. – 1986. - №8. – С.34-36.

Лабораторна робота 4

Розрахунок кількості структурних складових металу навколо шовної ділянки

Мета роботи: Дослідити розрахункові методи визначення кількості структурних складових в навколо шовній ділянці ЗТВ

Завдання роботи: Навчитися визначати вміст мартенситу та бейніту, а також ферито-перлітної суміші та бейніту (%) в навколо шовній ділянці ЗТВ зварного з'єднання.

Устаткування, прилади, матеріали

1. Для визначення мартенситу та бейніту використовувати зразки з таким хімічним складом:

Таблиця 4.1. Хімічний склад зразків

Варіант	Хімічний склад сталі, %									$\omega_{6/5}$, град/с
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	V	B	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0,32	0,60	0,40	1,0	1,50	0,30	-	0,10	-	60

2	0,30	0,60	0,40	0,5	1,00	0,20	0,05	-	-	55
3	0,25	0,40	0,30	0,5	0,50	0,10	-	0,05	-	30
4	0,20	0,40	0,30	0,4	0,40	0,08	-	0,08	-	32
5	0,21	0,30	0,20	0,5	-	0,08	0,05	0,05	0,002	35
6	0,22	0,30	0,25	0,2	0,20	0,10	0,04	0,08	0,001	29
7	0,23	0,25	0,20	-	-	0,12	0,05	0,08	0,002	34
8	0,21	0,40	0,25	0,4	0,40	-	0,10	-	0,002	31
9	0,24	0,35	0,30	0,5	0,45	0,08	0,08	0,09	0,002	35
10	0,20	0,40	0,35	0,6	0,60	0,10	0,04	0,08	0,003	30
11	0,22	0,40	0,40	0,7	0,50	0,12	-	0,10	-	40
12	0,19	0,30	0,30	0,7	0,60	0,11	0,05	0,10	0,001	38
13	0,22	0,40	0,35	0,5	0,20	0,10	-	0,08	0,002	33
14	0,30	0,40	0,40	0,6	1,00	0,20	-	-	-	45

2. Для визначення феритно-перлітної суміші використовувати зразки з таким хімічним складом табл. 4.2

Таблиця 4.2. Хімічний склад зразків

Варіант	Хімічний склад сталі, %									$\omega_{6/5}$, град/с
	С	Мп	Si	№	Cr	Mo	Si	V	B	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0,07	0,5	0,3	-	-	0,10	0,08	0,08	-	35
2	0,09	0,4	0,2	0,5	0,1	-	0,06	-	-	44
3	0,08	0,6	0,3	-	0,1	0,10	0,05	0,10	0,002	20
4	0,10	0,3	0,2	-	-	0,12	-	-	-	50
5	0,08	0,2	0,2	-	-	-	-	0,10	0,001	60
6	0,11	0,2	0,2	-	-	0,10	-	-	0,002	30
7	0,12	0,2	0,2	-	0,2	-	-	-	-	36
8	0,10	0,2	0,3	0,6	0,1	-	0,10	-	-	40
9	0,15	0,6	0,2	-	-	-	-	-	-	25
10	0,07	0,4	0,2	0,5	-	-	0,15	-	-	38
11	0,08	0,3	0,2	-	0,2	-	-	-	0,002	45
12	0,09	0,1	0,1	0,6	0,5	0,08	-	0,10	-	25
13	0,11	0,3	0,2	0,4	-	0,09	-	0,10	-	30
14	0,10	0,4	0,2	-	0,3	-	-	0,08	-	45

Теоретичні основи роботи

Для низьколегованих сталей розроблені розрахункові методи визначення кількості структурних складових в навколошовній ділянці ЗТВ [2]. Ці методи слід вважати орієнтовними, оскільки вони не враховують металургійні особливості виплавлення окремих марок сталей та високотемпературних перетворень аустеніту від зварювального тепла.

Кількість мартенситу (М) та ферито-перлітної суміші (ФП) в навколошовній ділянці ЗТВ низьколегованої сталі можна визначити за наступними рівняннями, %:

$$M=100\left[0,95 - \exp\left(-k_M\omega_{6/5}^{n_M}\right)\right] \quad (4.1)$$

$$\text{ФП} = 100\exp\left(-k_{\text{фп}}\omega_{6/5}^{n_{\text{фп}}}\right), \quad (4.2)$$

де $\omega_{6/5}$ - середня швидкість охолодження металу шва в інтервалі температур 600.500 °С, °С/с; k_M , $k_{\text{фп}}$, n_M , $n_{\text{фп}}$ - розрахункові коефіцієнти, які знаходять за виразами

$$n_M = \frac{3,3475}{\ln(\omega_{M_2}/\omega_{M_1})} ; \quad k_M = \frac{0,1054}{(\omega_{M_1})^{n_M}} ;$$

$$n_{\text{фп}} = -\frac{4,067}{\ln(\omega_{\text{фп}2}/\omega_{\text{фп}1})}; \quad k_{\text{фп}} = \frac{2,9957}{(\omega_{\text{фп}1})^{n_{\text{фп}}}}$$

ω_{M_1} , ω_{M_2} - критичні швидкості охолодження, які відповідають утворенню 5 і 90 % мартенситу;

$\omega_{\text{фп}1}$, $\omega_{\text{фп}2}$ - критичні швидкості охолодження, які відповідають утворенню 5 і 90 % ферито-перліту;

$$\omega_{M_1} = 0,343C_{\text{екв}}^{-4,116};$$

$$\omega_{M_2} = 3,217C_{\text{екв}}^{-3,838};$$

$$\omega_{\text{фп}1} \approx \omega_{M_1};$$

$$\omega_{\text{фп}2} \approx 0,1\omega_{\text{фп}1}$$

Для (4.1) та (4.2) вуглецевий еквівалент визначається наступним чином:

$$C_{\text{екв}} = C + \text{Si}/24 + \text{Mn}/6 + \text{Ni}/10 + \text{Cr}/5 + \text{Mo}/4 + \text{Cu}/15 + \text{V}/14 + 5\text{B}.$$

За утворення мартенситних структур завжди відповідає залишковий вміст аустеніту. Він невеликий та може бути прийнятим на рівні 5 %. Тоді вміст бейніту в навколошовній ділянці, %:

$$Б = 100 - (М + 5).$$

За ферито-перлітної структури вміст бейніту визначається як додаток до 100 %.

Методика роботи

1.Методом розрахунку визначили вміст мартенситу та бейніту (%) в навколошовній ділянці ЗТВ зварного з'єднання для заданих хімічного складу сталі та швидкості охолодження, а також визначити вміст ферито-перлітної суміші та бейніту (%) в навколошовній ділянці ЗТВ зварного з'єднання для заданих хімічного складу сталі та швидкості охолодження.

Аналіз результатів роботи

Зміст звіту

Звіт повинен містити: назву та завдання роботи; стислі теоретичні основи роботи; методику роботи; результати роботи та їх аналіз.

Контрольні питання

Список літератури

1. Шоршоров М.Х. Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке [Текст]/М.Х. Шоршоров, В.В. Белов.- М.: Наука, 1972.-220 с.
2. Макаров Э.Л. Экспериментально-расчетная методика определения структуры в околошовной зоне легированных сталей [Текст]/Э.Л.Макаров, С.Н. Глазунов// Сварочноепроизводство. – 1986. - №8.- С.34-36.
3. Сливінський О.А. Здатність до зварювання конструкційних матеріалів [Текст]/навч. Посібн./ О.А. Сливінський.-К.:НТУУ «КПІ», 2010.- 260 с.- Бібліогр.: с. 253-259. -400 пр. – ISBN 978-966-622-354-1.

Лабораторна робота №5

Визначення схильності металу зварних з'єднань до утворення гарячих тріщин

Мета роботи: Дослідити механізм виникнення гарячих тріщин, та навчитися оцінювати тріщиностійкість зварних швів.

Завдання роботи: Освоїти методику оцінки стійкості металу шва до виникнення гарячих тріщин по критерію стійкості.

Устаткування, прилади, матеріали

1. Мікроскоп МІМ-8М
2. Зразки зварних з'єднань з утвореними гарячими тріщинами.
3. Зразки з різним хімічним складом низьколегованих сталей

Таблиця 5.1

Варіант	Хімічний склад сталі, %								
	C	S	P	Si	Ni	Mn	Cr	Mo	V
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,17	0,035	0,035	0,35	3,12	0,55	1,60	0,30	-
2	0,37	0,034	0,033	0,35	-	1,25	1,30	-	0,11
3	0,44	0,031	0,032	1,55	-	0,57	1,60	-	-
4	0,29	0,032	0,031	0,37	-	1,20	1,20	0,29	-
5	0,34	0,030	0,030	0,37	-	0,60	2,70	0,30	0,12
6	0,44	0,028	0,029	0,37	-	0,70	1,10	0,30	0,18
7	0,43	0,033	0,032	0,36	-	0,80	1,05	-	0,15
8	0,45	0,027	0,028	0,35	1,40	0,80	0,75	-	-
9	0,49	0,032	0,032	0,37	1,30	0,75	0,70	-	-
10	0,34	0,034	0,033	1,20	1,80	1,30	1,20	-	-
11	0,40	0,030	0,029	0,37	1,65	0,50	1,65	0,25	0,17
12	0,40	0,030	0,030	0,35	3,50	0,50	1,50	0,40	0,18
13	0,25	0,030	0,033	0,37	0,30	0,75	1,00	0,60	0,25
14	0,40	0,032	0,030	0,36	4,00	0,35	1,35	0,40	0,13

Теоретичні основи роботи

У процесі виготовлення зварної конструкції за несприятливих умов можливо виникнення тріщин. Причини появи тріщин, а також їх види докладно розглянуто в [4]. Нижче наведемо найбільш поширені параметричні рівняння, які дозволяють оцінити опірність сталей різних типів утворенню тріщин залежно від умісту в основному металі легувальних елементів та домішок та інших факторів.

Загалом низьковуглецеві сталі мають хорошу зварність. Для сталей типу ВСтЗсп товщиною до 30 мм перевірка опірності до гарячих тріщин може проводитись за рівнянням [3]:

$$C_{\text{екв}} = C + \text{Mn}/6 + \text{Si}/24 + \text{Cr}/5 + (\text{Ni} + \text{Cu})/15.$$

За $C_{\text{екв}} < 0,4$, що відповідає концентрації вуглецю не більше 0,20% гарячі тріщини гарантовано відсутні. Це підтверджується на практиці, де складності зі зварюванням низьковуглецевих сталей виникають лише на товщина більших за 30.35 мм. В цьому випадку рекомендують попередній підігрів.

Для вуглецевих та низьколегованих сталей найбільше поширення знайшов розрахунковий показник схильності до утворення гарячих тріщин (Hot Cracking Susceptibility - HCS) [2]:

$$\text{HCS} = \frac{C(S+P+0,04Si+0,01Ni) \cdot 10^3}{3Mn+Cr+Mo+V}; \quad (5.1)$$

де HCS - параметр, що дозволяє оцінювати схильність зварних швів з низьколегованих сталей до утворення кристалізаційних тріщин у балах. Сталі з границею міцності $\sigma_b < 700$ МПа вважаються потенційно схильними до виникнення гарячих тріщин, якщо $\text{HCS} > 4$. Для сталей із межею міцності $\sigma_b > 700$ МПа виникнення тріщин у швах можливе вже за умови $\text{HCS} > 2$.

Для оцінювання тріщиностійкості високолегованих аустенітних сталей типу 18Cr-10Ni японськими дослідниками запропоновано використання розрахункового параметра високотемпературної пластичності ΔH [2]:

$$\Delta H = -700C + 17Cr - 37Ni - 117Nb + 29Mo - 188. \quad (5.2)$$

Якщо високотемпературна пластичність сталі $\Delta H > 100$, її гарячеламкість

вважається низькою і матеріал, таким чином, має високу опірність гарячим тріщинам. Рівняння (5.2) здобуто на підставі статистичної обробки випробувань корозійностійких сталей щодо гарячеламкості за температури не вищої ніж 1300 °С. Тому його можна використовувати тільки для прогнозування ймовірності виникнення гарячих тріщин у навколошовній зоні (сегрегаційних та підсолідусних).

У багатьох методиках експериментального оцінювання тріщиностійкості в процесі зварювання застосовують як порівняльний критерій сумарну довжину утворених у зразках гарячих тріщин (L). Результатом статистичної обробки подібних випробувань стало таке параметричне рівняння [1]:

$$L = 299C + 8Ni + 142Nb - 5,5(\delta_{Fe})^2 - 105. \quad (5.3)$$

Це рівняння можна використовувати для розрахунку схильності зварних швів високолегованих аустенітно-феритних сталей до утворення кристалізаційних тріщин. Відповідно δ_{Fe} - це вміст дельта-фериту в металі шва (%), який можна заздалегідь визначити за даними термодіаграм фазових перетворень або діаграми Шефлера. Якщо $L > 0$, сталь вважається схильною до утворення тріщин.

Ще одним підходом до попереднього оцінювання тріщиностійкості зварних швів з аустенітних сталей є порівняння відношення еквівалентних концентрацій хрому та нікелю за формулою [1]:

$$\frac{Cr_{екв}}{Ni_{екв}} = \frac{Cr + 1,37Mo + 1,5Si + 2Nb + 3Ti}{Ni + 0,31Mn + 22C + 14,2N + Cu} \quad (5.4)$$

із сумарним умістом у них сірки та фосфору ($P + S$). Якщо $P + S < 0,01 \dots 0,015$ %, співвідношення $Cr_{екв}/Ni_{екв}$ суттєво не впливає на тріщиностійкість. За сумарного вмісту фосфору та сірки ($P + S > 0,02 \dots 0,04$ %) стійкими проти утворення гарячих тріщин можуть вважатись зварні шви, які мають співвідношення $Cr_{екв}/Ni_{екв} > 1,5$.

Методика роботи

1. Розглянути у мікроскоп зразки з гарячими тріщинами, визначити як

розвивалась тріщина, який має характер руйнування.

2. Для низьколегованої сталі заданого хімічного складу оцінити схильність до утворення гарячих тріщин при зварюванні за показником *HCS* (рівняння 5.1)

Аналіз результатів роботи

1. Досліджені зразки показали як виникають гарячі тріщини
2. По різним методикам було проведено оцінювання тріщиностійкості в процесі зварювання низьколегованої сталі

Зміст звіту

Звіт повинен містити: назву та завдання роботи; стислі теоретичні основи роботи; методику роботи; результати роботи та їх аналіз.

Контрольні питання

1. Наведіть визначення гарячих тріщин при зварюванні їх класифікація
2. Потенційну схильність до утворення якого типу гарячих тріщин мають усі без винятку сплави?
3. Назвіть фактори, від яких залежить опірність гарячим тріщинам з точки зору теорії технологічної міцності
4. Розкрийте механізм утворення сегрегаційних тріщин в навколо шовній зоні.
5. Які матеріали мають схильність до утворення підсолідусних гарячих тріщин?
6. Охарактеризуйте методи машинних випробувань опірності матеріалів до гарячих тріщин
7. Наведіть приклади технологічних проб для оцінювання опірності до гарячих тріщин
8. Назвіть способи запобігання утворенню гарячих тріщин

Список літератури

1. Rujanpaa V. Cjuutlation Between Solidification Crfcking and Microstructure in Austenitic-Ferritic Stainless Steel Welds [Текст] /v. Kujanpaa, N. Suutala, T. Takalo, T. Moisio // Welding Research International. – 1979. -№9.- p. 55-76

2. Bailey N. Weldability of Ferritic Steels [Текст] /N. Bailey. – Cambridge:Abington Publishing, 1994. – 286 с/ - ISBN 1-85573-092-8
3. Задорожная Л.К. Оценка свариваемости стали ВСтЗсп [Текст] /Л.К. Задорожная, В.А. Савченков, В.Л. Кострыкин и др. // Сварочное производство. – 1981. №4. – С. 29-30.
4. Сливінський О.А. Здатність до зварювання конструкційних матеріалів [Текст]/навч. Посібн./ О.А. Сливінський.-К.:НТУУ «КПІ», 2010.- 260 с.- Бібліогр.: с. 253-259. -400 пр. – ISBN 978-966-622-354-1.

Лабораторна робота 6

Визначення схильності металу зварних з'єднань до утворення холодних тріщин

Мета роботи: Дослідити механізм виникнення холодних тріщин.

Завдання роботи: Освоїти методику оцінювання стійкості сплавів до виникнення холодних тріщин

Устаткування, прилади, матеріали

1. Пост для зварювання, джерело живлення ВДУ-504
2. Електроди з різними механічними властивостями і хімічним складом
3. Проби з кільцевою канавкою з різних матеріалів
4. Інструменти для зварювання.
5. Слюсарний інструмент для підготовки зразків
6. Обладнання та реактив для підготовки шліфів
7. Мікроскоп МІМ- 8М

Теоретичні основи роботи

Одна з причин порушення технологічної міцності - утворення холодних тріщин. Представлення про природу холодних тріщин ґрунтуються на

гартівній і водневій гіпотезах. Відповідно до гартівної гіпотези утворення тріщин при зварюванні, як і при загартуванні, обумовлено головним чином мартенситним перетворенням, яке протікає зі значною зміною обсягу і приводить до виникнення високих внутрішніх напружень.

Воднева гіпотеза припускає, що в процесі перетворень аустеніту атомарний водень виділяється з твердого розчину в мікропорожнечі, з'єднується в молекули і створює в навколишніх обсягах металу додаткові високі напруги.

В основу цих гіпотез покладена теорія тендітного руйнування Гриффитса, що припускає існування в металі готових зародкових тріщин. В даний час для пояснення холодних тріщин залучається механізм уповільненого руйнування, тобто руйнування при статичному навантаженні і кімнатній температурі. Для опису процесу зародження тріщин використовують схему Зинера, з якої видно, що опір границь зерен зрушенню знижене в порівнянні з тілом зерна. При цьому передбачається, що границі зерна здатні до упруго-в'язкого плину. Відповідно до цієї схеми прослизання по границях зерен, де діють дотичні напруження, які приводить до концентрації напруг на границях перпендикулярних осі напружень, що створює тріщину на стику зерен.

Аналіз накопичених практикою результатів показує, що інтенсивному утворенню холодних тріщин при температурах, близьких до кімнатної, у першу чергу сприяє підвищення температури загартування, швидкості охолодження, напруги і їхня концентрація. Для оцінки стійкості стали до утворення холодних тріщин застосовуються методи кількісної оцінки і технологічні проби.

Методи кількісної оцінки опору зварених з'єднань з утворенню холодних тріщин засновані на теорії уповільненого руйнування і передбачають механічні іспити зварних зразків з основного металу, оброблених по циклу околшовної зони. Іспити ці досить складні і вимагають спеціального устаткування і великих витрат часу.

Перевага іспитів за допомогою технологічних проб у порівнянні з кількісними методами іспитів полягає в можливості детально моделювати весь технологічний процес і, отже, судити про опір утворенню холодних тріщин в умовах, близьких до реальних. У більшості випадків проби являють собою зварні жорстко закріплені елементи тієї чи іншої форми. При цих іспитах доцільно збільшити твердість проб, оскільки це приводить до підвищення напруг і деформацій в області низьких температур. Однак проби не характеризують запас технологічної міцності, а придатні лише для порівняння і оцінки матеріалів.

Найчастіше як розрахунковий показник опірності вуглецевих та низьколегованих сталей проти утворення холодних тріщин використовують вуглецевий еквівалент. Згідно рекомендацій Міжнародного інституту зварювання (IIW) розрахунок вуглецевого еквіваленту проводять за рівнянням:

$$C_{\text{екв}} = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15}$$

Сталь вважається не схильною до утворення холодних тріщин якщо $C_{\text{екв}} < 0,4$

Альтернативне рівняння, прийняте в колишньому СРСР за рекомендаціями держстандарту ГОСТ 27772-88, має вигляд:

$$C_{\text{екв}} = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cu}{13} + \frac{V}{14} + \frac{P}{2}$$

У разі його використання сталь:

а) вважається не схильною до утворення холодних тріщин, якщо $C_{\text{екв}} < 0,35$ %;

б) може за певних конструкторсько-технологічних умов зварювання утворювати холодні тріщини, якщо $C_{\text{екв}} = 0,35 \dots 0,6$ %;

в) має високу схильність до утворення холодних тріщин, якщо $C_{\text{екв}} > 0,6$ %.

Для розрахункової оцінки опірності до холодних тріщин низьколегованих конструкційних сталей також застосовують параметричне рівняння японських дослідників Іто та Бесіо [1]. Його розроблено переважно для товстостінних зварних з'єднань з V-, U- або X-подібною підготовкою крайків. Оцінку проводять за спеціальним параметром тріщиноутворення, що враховує хімічний склад сталі, вміст водню та товщину матеріалу:

$$P_w = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn+Cr+Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo+V}{15} + 5B + \frac{[H]}{60} + \frac{k_0 \delta}{40 \cdot 10^4}; \quad (5.1)$$

де $[H]$ - вміст дифузійного водню, $\text{см}^3/100$ г;

k_0 - коефіцієнт жорсткості зварного з'єднання, що визначається силою переміщення крайка з'єднання на 1 мм, віднесеною до одиниці товщини листа і довжини шва, $\text{Н}/(\text{мм мм})$;

δ - товщина металу, мм.

Зазвичай величини $[H]$ та k_0 визначаються експериментально. Для різних за жорсткістю зварних з'єднань коефіцієнт k_0 складає $200 \dots 4000$ $\text{Н}/(\text{мм}^2 \text{мм})$ [2].

За $P_w > 0,286$ сталь вважається схильною до холодних тріщин при зварюванні.

Методика роботи

1. У процесі лабораторної роботи необхідно провести випробування на кільцевій пробі з канавкою при зварюванні різних сталей різними зварювальними матеріалами, до складу яких входять легуючі (Ni, Mo, Cr, Mn,

Si). Для цього на підготовлених під зварювання зразках з кільцевою канавкою, по задалегідь підбраному режиму, зробити зварювання. Режим зварювання: $I = 200-220 \text{ А}$, $U = 30-36 \text{ В}$. Марка електрода задається викладачем. Зварювання виконувати по трьох варіантах:

1. Зразок перед зварюванням підігріти в печі до $T = 473 \text{ К}$ (200 °C) – 523 К (250 °C). Після зварювання остудити на повітрі.

2. Зварювання робити при кімнатній температурі; зразок остудити на повітрі.

3. Зварювання робити при кімнатній температурі; зразок остудити проточною водою.

Аналогічну серію експериментів виконувати і для іншого основного металу при зварюванні електродом іншого хімічного складу.

Після повного охолодження зразків шліфувальною машиною обробити їхню поверхню. Потім зразки протравити реактивом для виявлення макро- і мікроструктури, після чого виміряти довжину тріщин на кожному зразку. Проаналізувати отримані результати з огляду, що критерієм оцінки служить відношення довжини тріщини до довжини всього наплавлення, а також кількість тріщин. Визначити тип тріщин. Замалювати схему технологічної проби (зразок).

4. За методикою оцінити можливість зварювання без утворення холодних тріщин сталей вказаних марок табл. 6.1, 6.2

Таблиця 6.1.

Варіант	Марка сталі	Вміст дифузійного водню в металі шва [н], $\text{см}^3/100 \text{ г}$	Товщина металу δ , мм	Коефіцієнт жорсткості з'єднання k_0 , $\text{Н}/(\text{мм}^2\text{мм})$
1	15ХА	1,2	4,5	500
2	15Г	1,0	5,5	500
3	10Г2	1,3	6,5	600
4	18ХГ	4,5	4,0	500
5	20ХГР	2,2	5,0	500
6	15ХМ	2,0	6,0	500
7	15ХФ	1,0	4,5	500
8	20Х	3,0	7,0	600
9	18ХГТ	2,0	10,0	700
10	20ХНР	4,0	12,0	800
11	20ХГСА	5,0	20,0	1200
12	20ХГНР	1,1	25,0	1500

13	15XСНД	3,3	10,0	650
14	14ГНД	1,5	30,0	2000

Таблиця 6.2. Хімічний склад низьколегованих сталей

Сталь	Масова частка елемента, %					
	С	Si	Mn	Cr	Ni	Інші елементи
15ХА	0,12-0,17	0,17-0,37	0,40-0,70	0,70-1,00	-	-
15Г	0,12-0,19	0,17-0,37	0,70-1,00	-	-	-
10Г2	0,07-0,15	0,17-0,37	1,20-1,60	-	-	-
18ХГ	0,15-0,21	0,17-0,37	0,90-1,20	0,90-1,20	-	-
20ХГР	0,18-0,24	0,17-0,37	0,70-1,00	0,75-1,05	-	-
15ХМ	0,11-0,18	0,17-0,37	0,40-0,70	0,80-1,10	-	0,40-0,55 Мо
15ХФ	0,12-0,18	0,17-0,37	0,40-0,70	0,70-1,10	-	0,06-0,12 V
20Х	0,17-0,23	0,17-0,37	0,50-0,80	0,70-1,00	-	-
18ХГТ	0,17-0,23	0,17-0,37	0,80-1,10	1,00-1,30	-	0,03-0,09 Ti
20ХНР	0,16-0,23	0,17-0,37	0,60-0,80	0,70-1,10	0,80-1,10	-
20ХГСА	0,17-0,23	0,90-1,20	0,80-1,10	0,80-1,10	-	-
20ХНР	0,16-0,23	0,17-0,37	0,70-1,00	0,70-1,10	0,80-1,10	-
15XСНД	0,12-0,18	0,40-0,70	0,40-0,70	0,60-0,90	0,30-0,60	0,20-0,40 Cu
14ГНД	0,11-0,17	0,20-0,40	0,90-1,30	0,20-0,60	0,80-1,30	0,50-0,80 Cu

Аналіз результатів роботи

1. Проаналізувати отримані зварні проби і зробити висновок про їхню стійкість проти утворення, холодних тріщин.
2. На схемі зварної проби указати розташування тріщин. Сформулювати передбачувану причину утворення холодних тріщин.
3. На основі розрахункової методики оцінити можливість зварювання без утворення холодних тріщин сталей вказаних марок.

Зміст звіту

Звіт повинен містити: назву та завдання роботи; стислі теоретичні основи роботи; методику роботи; результати роботи та їх аналіз.

Контрольні питання

1. Наведіть визначення холодних тріщин в зварних з'єднаннях.
2. Наведіть класифікацію холодних тріщин
3. Назвіть та охарактеризуйте фактори, що зумовлюють утворення холодних тріщин у зварному з'єднанні.
4. Наведіть закономірності уповільненого руйнування загартованої сталі.

5. Сталі яких класів мають потенційну схильність до холодних тріщин?
6. Наведіть приклади розрахункових методів оцінювання опірності сталей до холодних тріщин.
7. Наведіть приклади технологічних проб для оцінювання опірності до холодних тріщин.
8. Назвіть способи запобігання утворення холодних тріщин.

Список літератури

1. Ito Y. Weldability Formula of High Strength Steels [Текст] / Y. Ito, K. Bessyo // IIW Dos. IX- 576-1968.
2. Лебедев Б.Д. Расчетные методы в сварке плавлением [Текст] Б.Д. Лебедев, В.В. Перемитько. – Днепродзержинск.: ДГТУ, 1998. – 285 с.
3. Грабин В.Ф. Металоведение сварки плавлением. –К.: Наукова думка, 1982. - 416 с.
4. Макаров Э.Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. – М.:Машиностроение,1981. – 247 с.

Лабораторна робота 7

Розрахунок температури попереднього підігрівання

Мета роботи: Дослідити методику визначення температури попереднього підігрівання для попередження холодних тріщин в зварних з'єднаннях

Завдання роботи: Навчитися застосовувати методику Сеферіан для визначення попереднього підігрівання зварних з'єднаннях вуглецевих та низьколегованих сталей для попередження холодних тріщин

Устаткування, прилади, матеріали

Варіанти марок сталей для розрахунку температури попереднього підігрівання за методикою Сеферіана

Варіант	Марка сталі	Товщина металу δ , мм	Хімічний склад сталі, %					
			C	Mn	Cr	Ni	Mo	V
1	30ХН3А	50	0,33	0,60	0,90	3,15	-	-
2	40ХМФА	40	0,44	0,70	1,10	-	0,30	0,16
3	20Н2М	55	0,25	0,70	-	1,90	0,30	-
4	40ХН	42	0,41	0,80	0,75	1,40	-	-
5	30ХГС	45	0,35	1,10	1,10	-	-	-

6	38Х2Н2МА	42	0,37	0,50	1,70	1,70	0,25	-
7	40ХН2МА	40	0,40	0,80	0,90	1,65	0,22	-
8	30ХГСН2А	45	0,33	1,30	1,20	1,80	-	-
9	38ХГН	38	0,43	1,10	0,80	1,00	-	-
10	40Х2Н2МА	42	0,42	0,60	1,65	1,75	0,30	-
11	38ХН3МА	36	0,40	0,50	1,20	3,25	0,25	-
12	38ХН3МФА	60	0,39	0,50	1,50	3,50	0,45	0,15
13	40ХГ	55	0,41	1,10	1,20	0,20	-	-
14	35ХМ		0,39	0,70	1,10	0,25	0,25	-

Теоретичні основи роботи

У випадках, коли існує небезпека утворення холодних тріщин, необхідно йти шляхом зменшення жорсткості конструкції, зниження концентрації дифузійного водню в металі шва та попередження виникнення гартівних структур. Якщо зменшити жорсткість конструкції в більшості випадків неможливо, то впливати умовами зварювання на кількість водню та фазові перетворення цілком можливо. Так, Д. Сеферіан запропонував методику визначення температури попереднього підігрівання для попередження холодних тріщин в зварних з'єднаннях вуглецевих та низьколегованих сталей [1]. Спочатку розраховується вуглецевий еквівалент:

$$C_{\text{екв}} = C + \frac{Mn+Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7}{90} Mo \quad (7.1)$$

Далі в розраховане значення вноситься поправка на товщину з'єднуваного металу, мм:

$$C'_{\text{екв}} = 0,005\delta C_{\text{екв}} \quad (7.2)$$

Тоді загальний вуглецевий еквівалент

$$C''_{\text{екв}} = C_{\text{екв}} + C'_{\text{екв}} = C_{\text{екв}} (1 + 0,005\delta), \quad (7.3)$$

а температура попереднього підігрівання

$$T_n = 350 \sqrt{C''_{\text{екв}}} - 0,25 \text{ [}^\circ\text{C]}. \quad (7.4)$$

Існує також альтернативна методика визначення температури попереднього підігрівання низьколегованої сталі в залежності від вмісту в ній легувальних елементів та товщини прокату, що зварюється (рис. 7.1). Значення $C_{\text{екв}}$, що

відкладається по вісі абсцис знаходять за формулою:

$$C_{\text{екв}} = C + \text{Mn}/6 + \text{Si}/5 + \text{Cr}/6 + \text{Ni}/12 + \text{Mo}/4 + \text{V}/5 + \text{Cu}/7 + \text{P}/2. \quad (7.5)$$

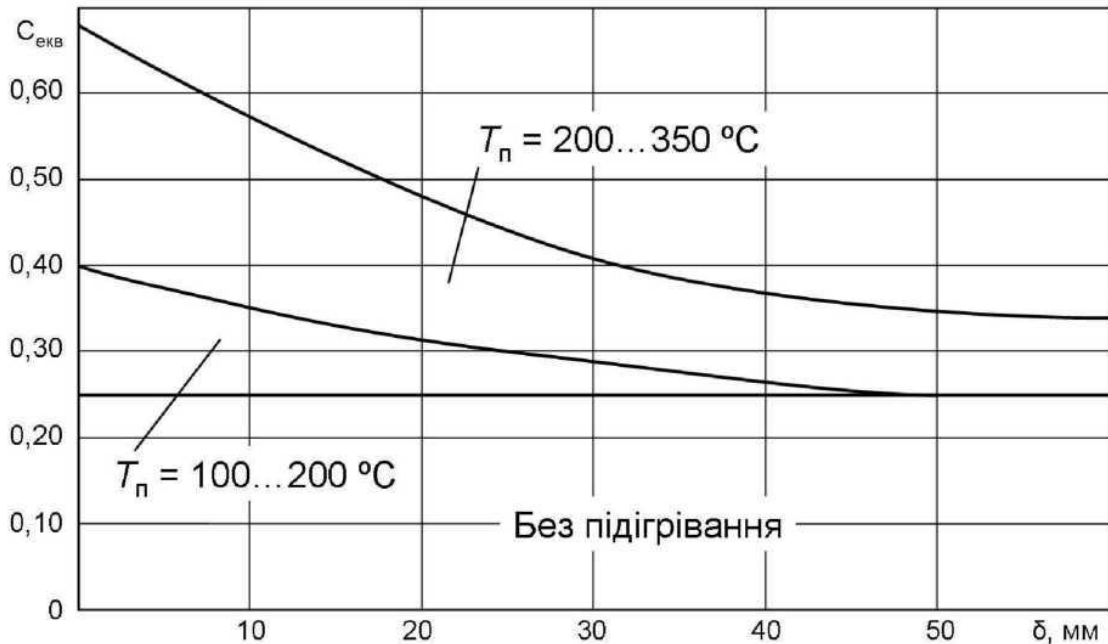


Рис. 7.1. Діаграма для визначення температури попереднього підігрівання T_n в залежності від вуглецевого еквіваленту $C_{\text{екв}}$ та товщини зварюваного прокату δ [2]

У разі виконання багатошарового зварного шва існує методика, яка дозволяє диференційовано визначати умови підігрівання для корневих та заповнювальних швів у відповідності до номограми на рис. 7.2.

Діаграму побудовано для низьколегованих сталей, що задовольняють умові $C_{\text{екв}} < 0,6 \%$, де:

$$C_{\text{екв}} = C + \text{Ni}/15 + \text{Mo}/4 + (\text{Cr} + \text{V})/5 + \text{Si}/13 + \text{P}/2 + 0,0024S,$$

S - товщина прокату, мм.

Крива А (рис. 7.2) відтворює умову необхідності попереднього підігрівання, а пряма Б - температуру нижньої границі інтервалу підігрівання. Побудову проводять через лінію 1 для кореня шва або 2 - для заповнювальних швів.

Методика роботи

Методику застосування номограми (рис. 7.2) розглянемо для зварювання кореневого шва сталі товщиною $\delta = 30$ мм при значенні струму зварювання $I = 250$ А, напруги на дузі $U = 25$ В, швидкості зварювання $V_{\text{зв}} = 25$ см/хв.

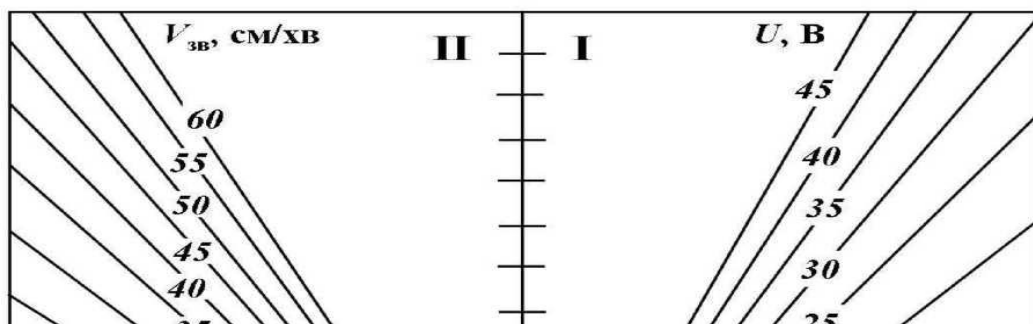


Рис. 7.2. Монограма для визначення температури попереднього підігрівання, залежної від технологічних параметрів

Проводимо перпендикуляр з точки *a*, що відповідає $I = 250$ А, до перетину з прямою, що відповідає напрузі зварювання $U = 25$ В, і одержуємо точку *b* в квадранті I. Далі проводимо горизонталь *b - в* до перетину з прямою, яка відповідає $V_{зв} = 25$ см/хв., в квадранті II. Після цього опускаємо перпендикуляр з точки *в* до перетину з кривою, що відповідає товщині прокату $\delta = 30$ мм, й одержуємо точку *г*. Далі проводимо горизонталь *г - д* до перетину з прямою 1, що відповідає умовам зварювання кореневого шва в квадранті IV. З точки *д* проводимо перпендикуляр до шкали температур і визначаємо температуру попереднього підігрівання $T = 150$ °С.

Аналіз результатів роботи

За результатами розрахунків зробити висновок яка температура попереднього підігрівання необхідна для сталі з заданим хімічним складом для попередження виникнення холодних тріщин.

Зміст звіту

Звіт повинен містити: назву та завдання роботи; стислі теоретичні основи роботи; методику роботи; результати роботи та їх аналіз.

Контрольні питання

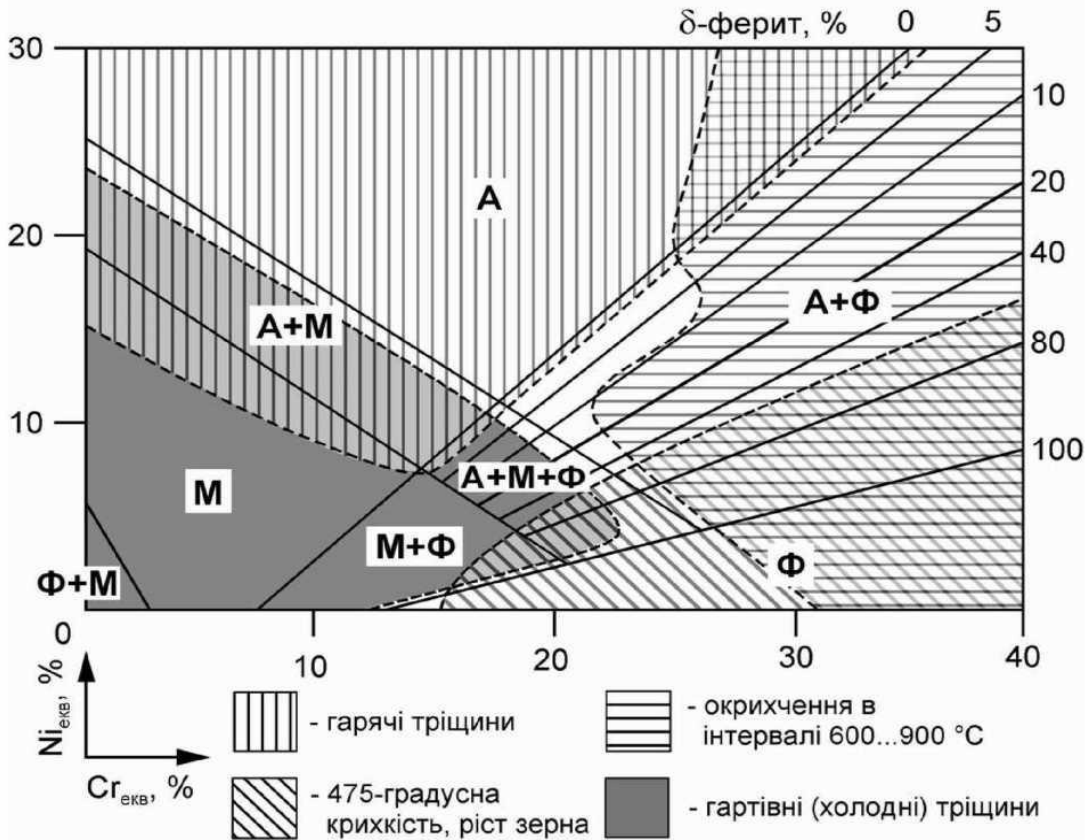
1. Наведіть визначення холодних тріщин в зварних з'єднаннях.
2. Наведіть та охарактеризуйте фактори, що зумовлюють утворення холодних тріщин у зварному з'єднанні.
3. Наведіть приклади розрахункових методів оцінювання опірності сталей до холодних тріщин.
4. Чим відрізняються міри попередження тріщин при зварюванні елементів малої та великої товщини?

Список літератури

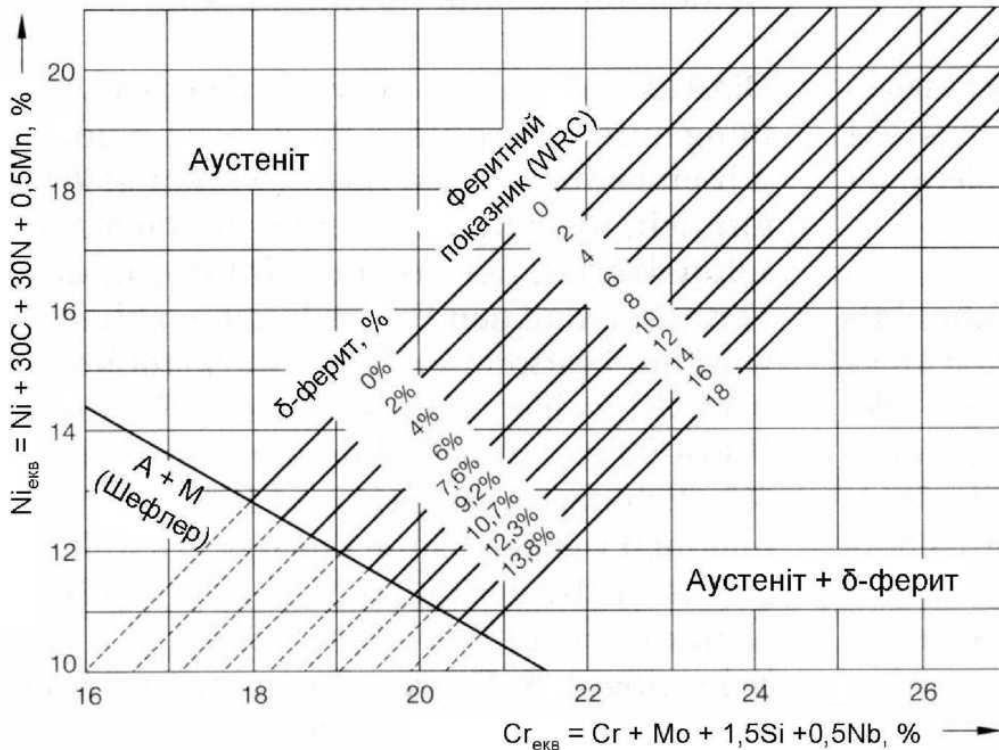
1. Сефериан Д. Металургия сварки [Текст] / Д. Сефериан; пер. С фр. И.Н. Вороновицкого и В.Д. Тарлинского. – М.: машгиз, 1963. 343 с. – Библиогр.: с. 339-344. – 3500 экз. – Перевод узд.: Metallurgie de la Soudure / D. Seferian. Paris: Dunod.
2. Ehrenberg H. Gedanken zum Vorwärmen beim Schweißen von Stahl [Текст] /H. Ehrenberg //Schweißtechnik. – 1981. – Nr.6. – S. 39-50.
3. Потак Я. М. Структурная диаграмма низкоуглеродистых нержавеющей сталей применительно к литому и наплавленному при сварке металлу [Текст] /Я.М. Потак, Е.А. Сагалевич // Автоматическая сварка. – 1972. - №5. – С. 10-13

Діаграми для визначення фазового складу металу зварного шва високолегованих сталей

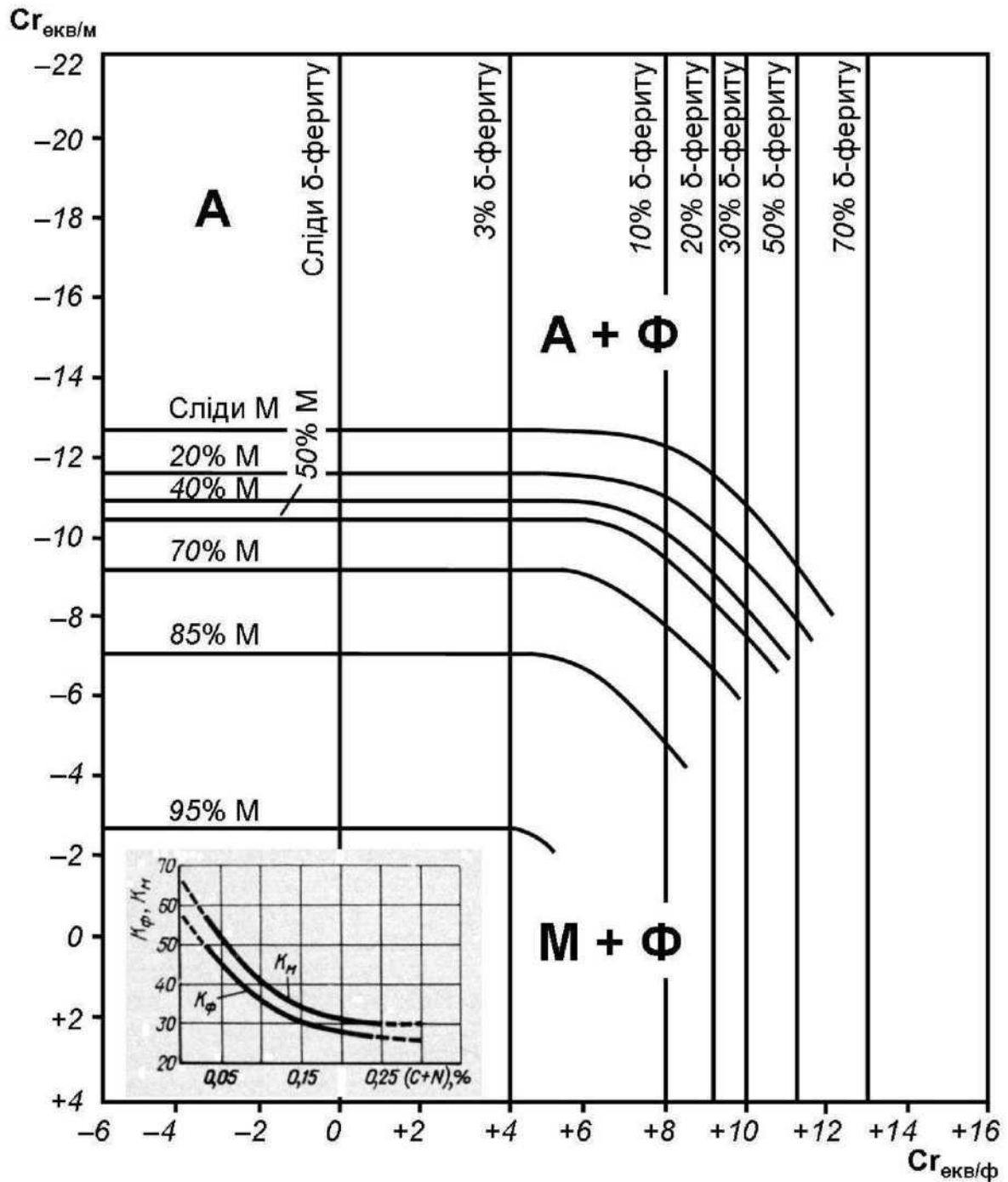
Діаграма Шефлера [12]



Діаграма ДеЛонга [15]

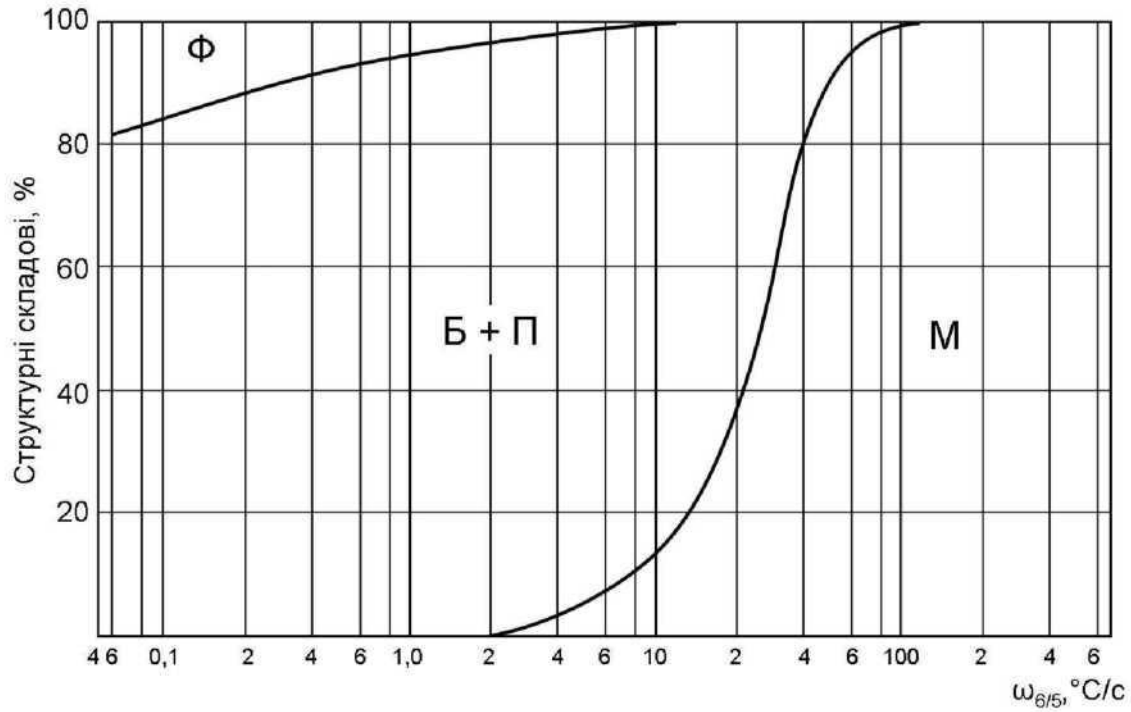


Діаграма Потака-Сагалевича [16]

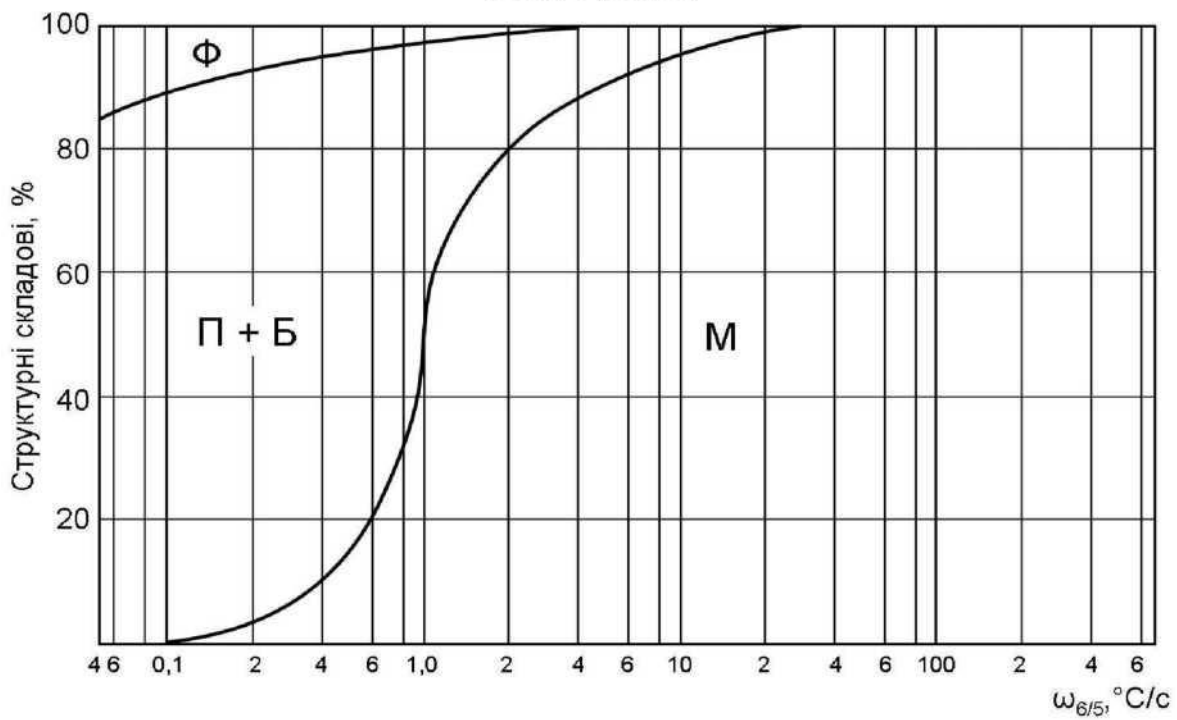


Діаграми для визначення кількості структурних складових навколошовної ділянки ЗТВ різних сталей залежно від швидкості охолодження в інтервалі температур 600...500 °С

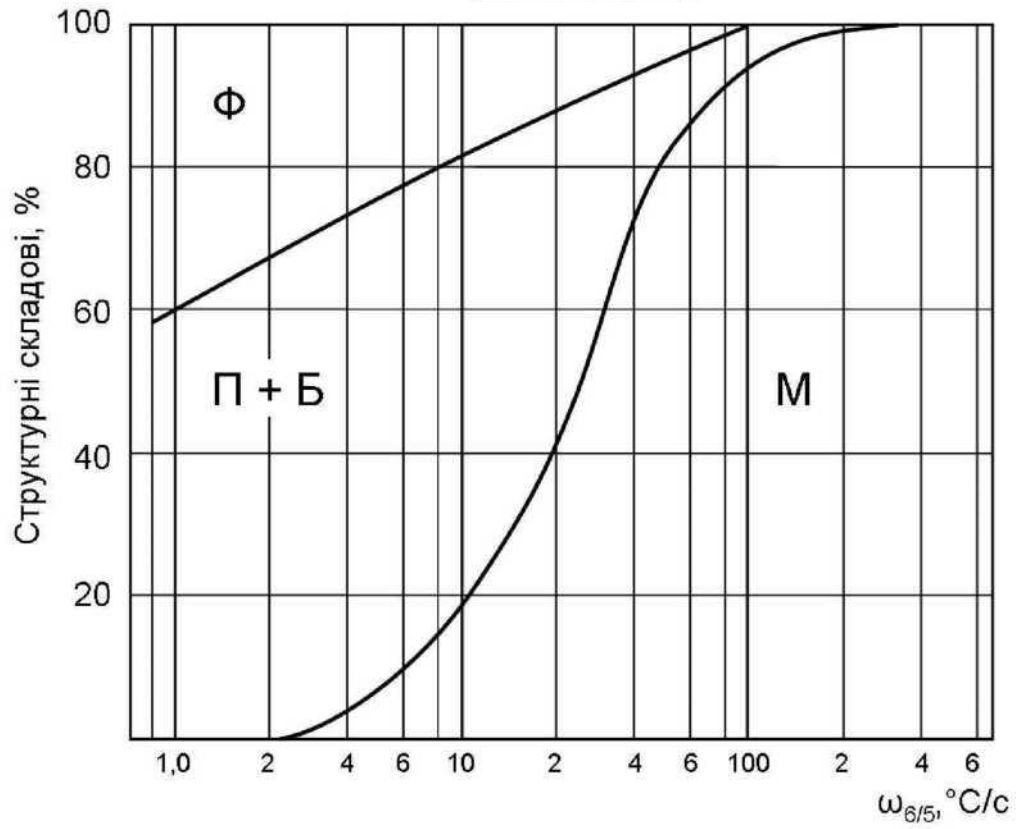
Сталь 30ХМА



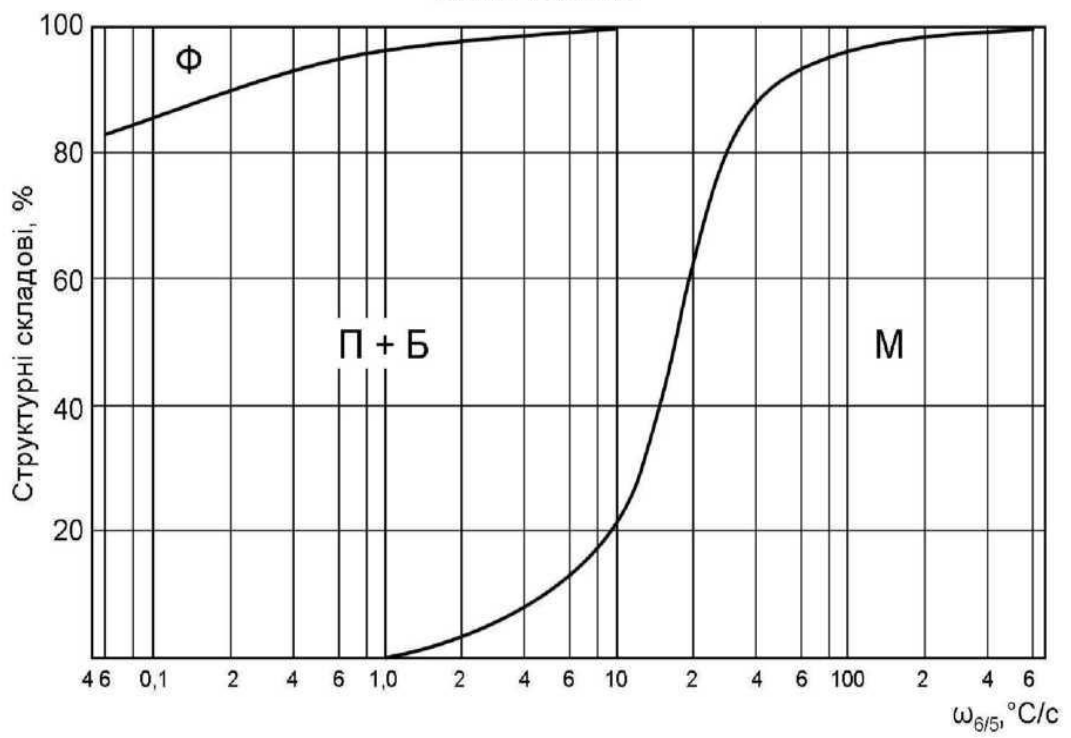
Сталь 45ХМА



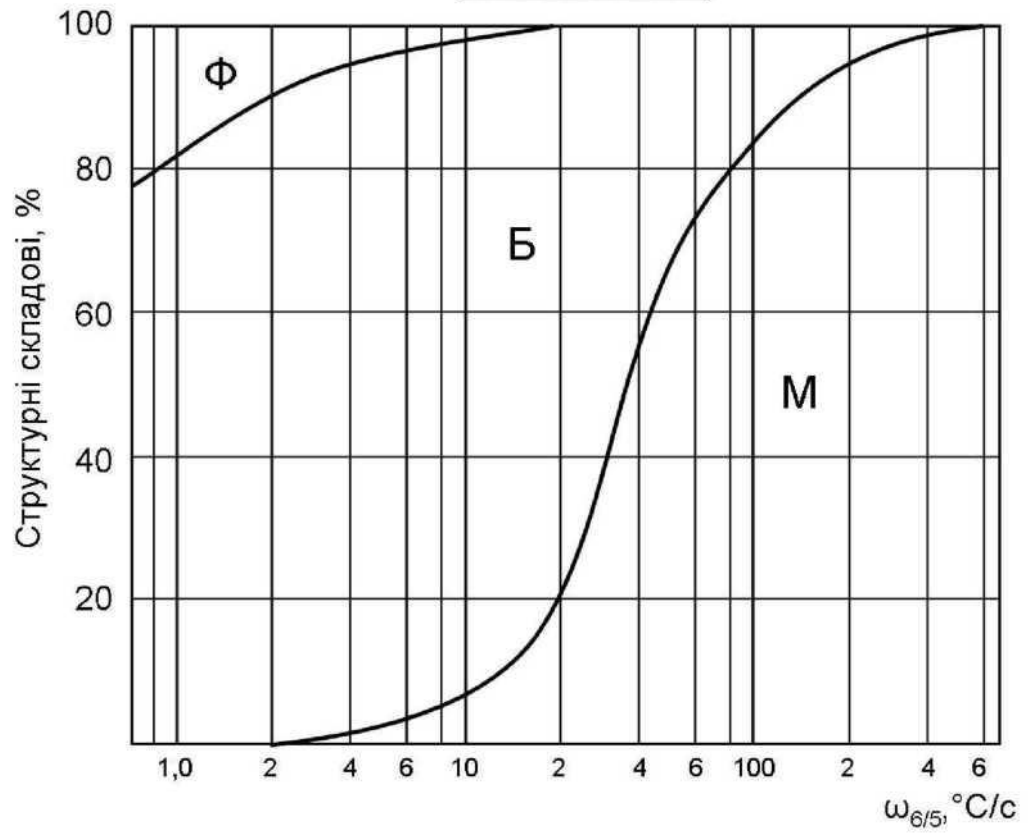
Сталь 25Г2Л



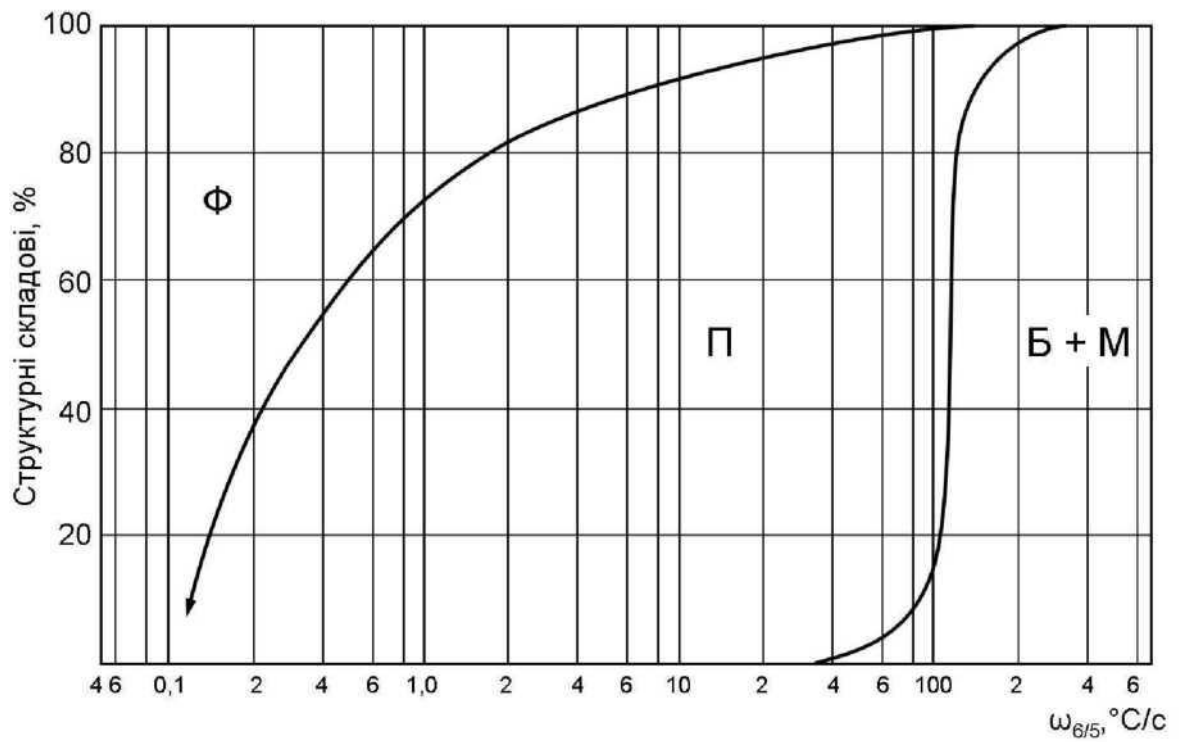
Сталь 15ХГНМ



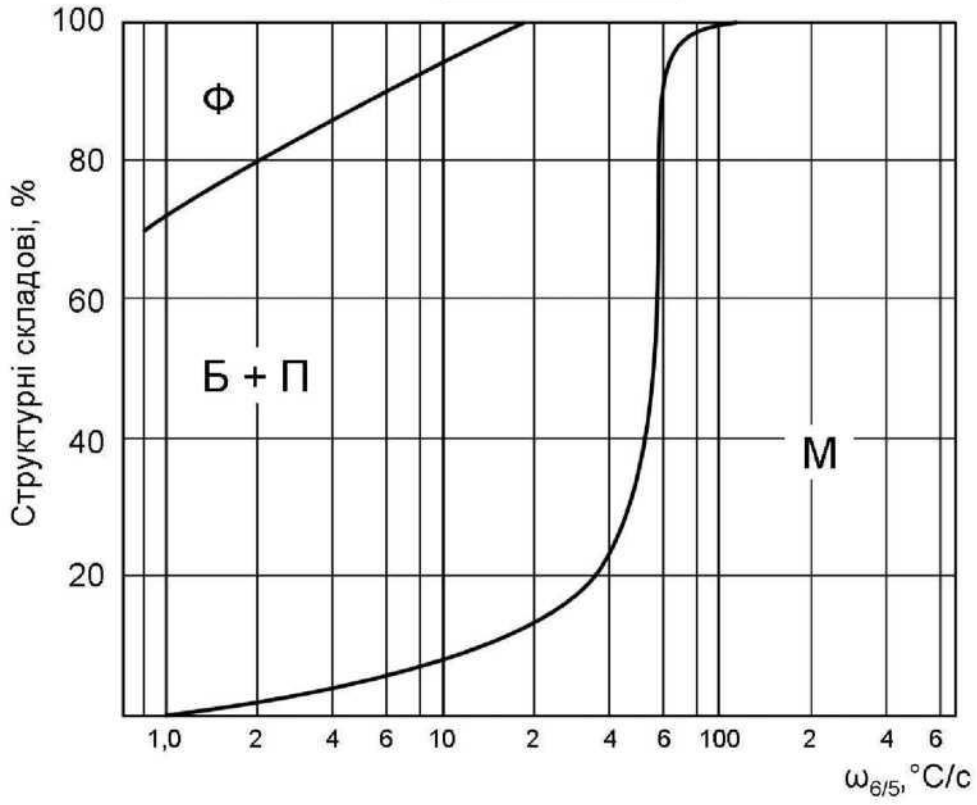
Сталь 20Х2МФ



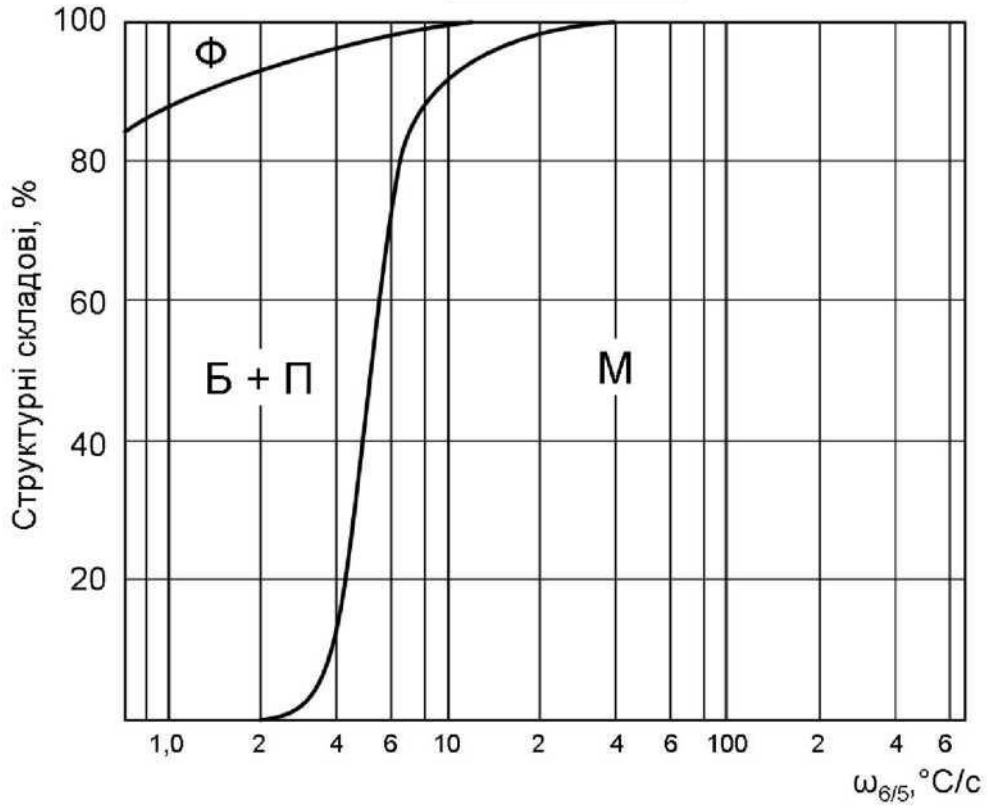
Сталь 10Г2Б



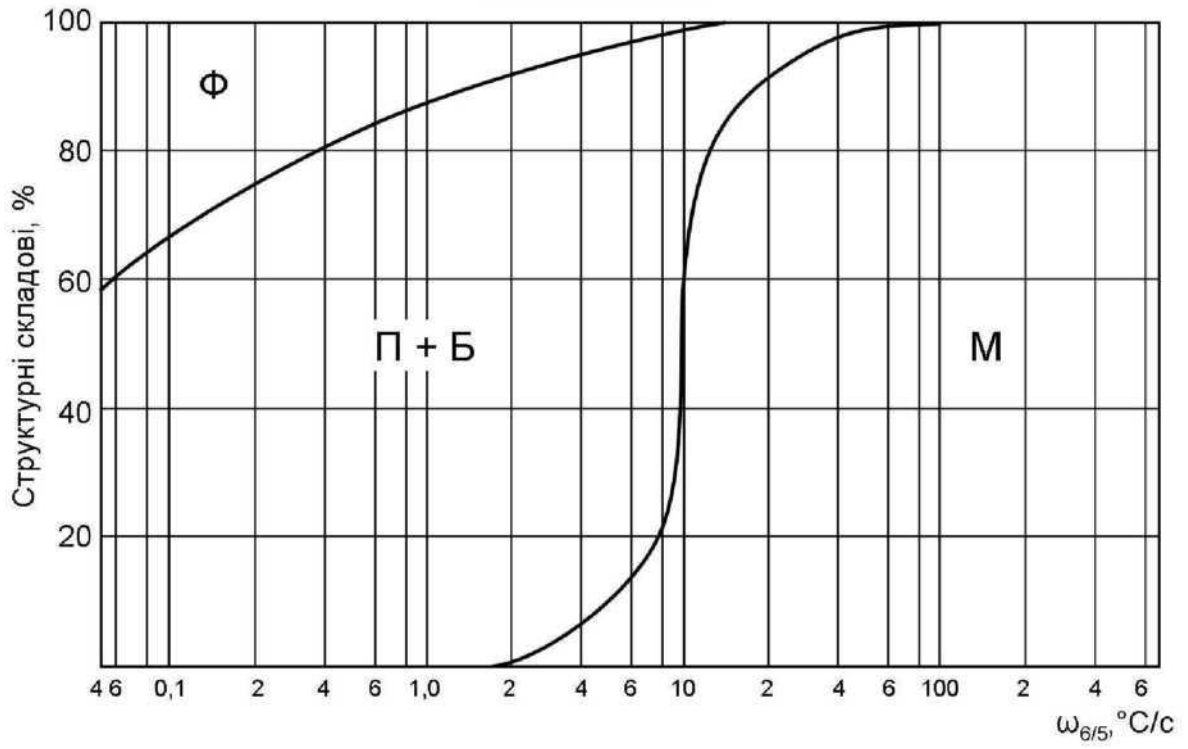
Сталь 18Х2ВФ



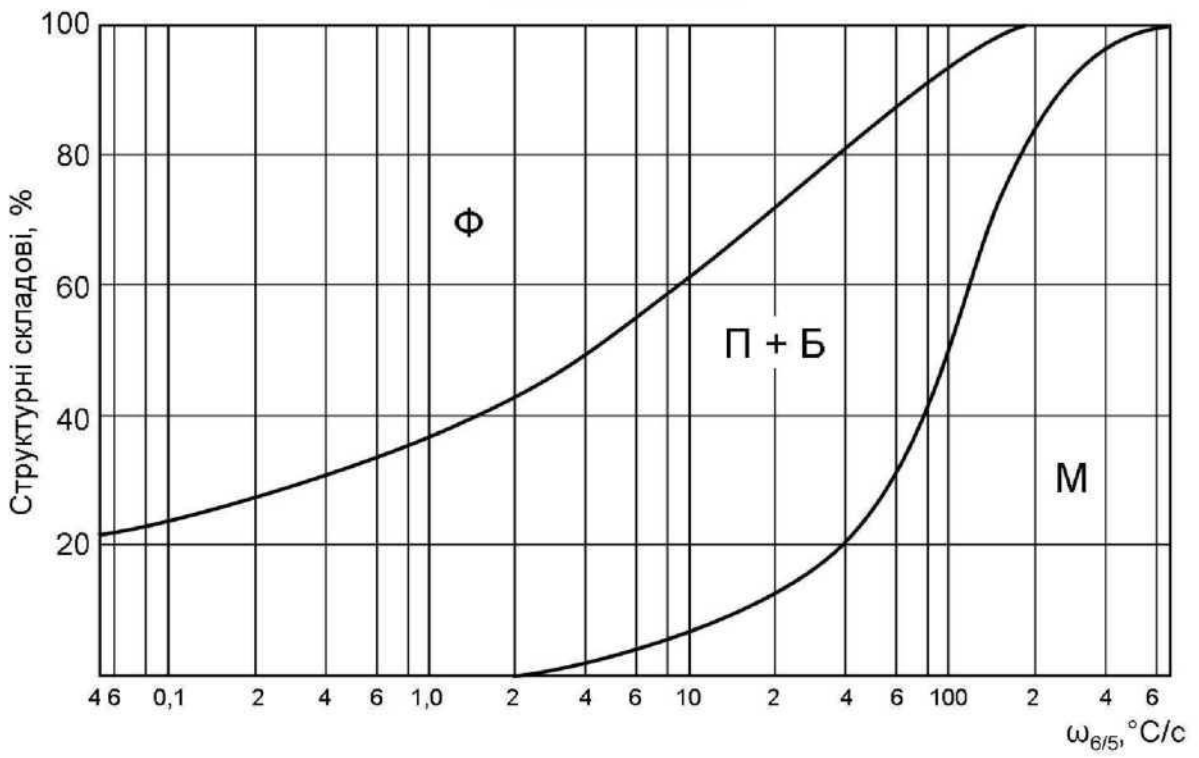
Сталь 30ХГСА



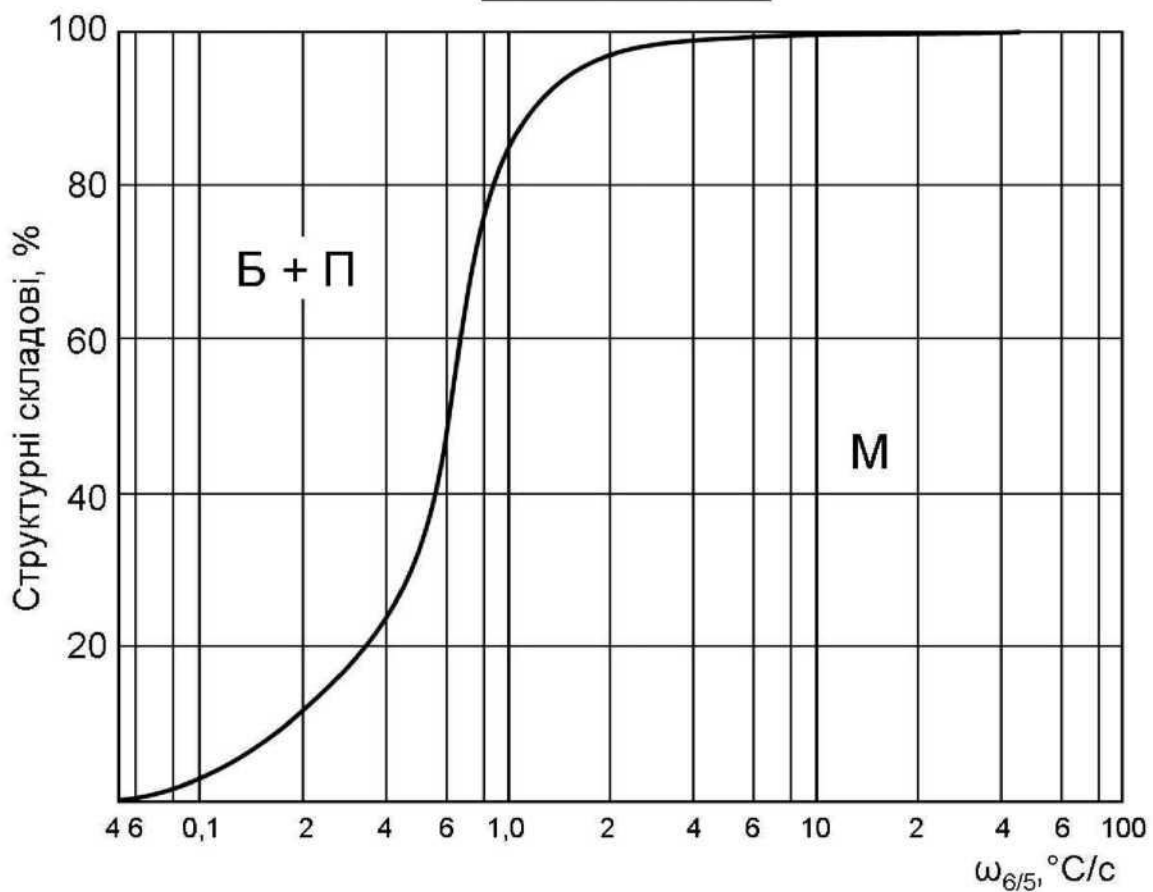
Сталь 25ХГФА



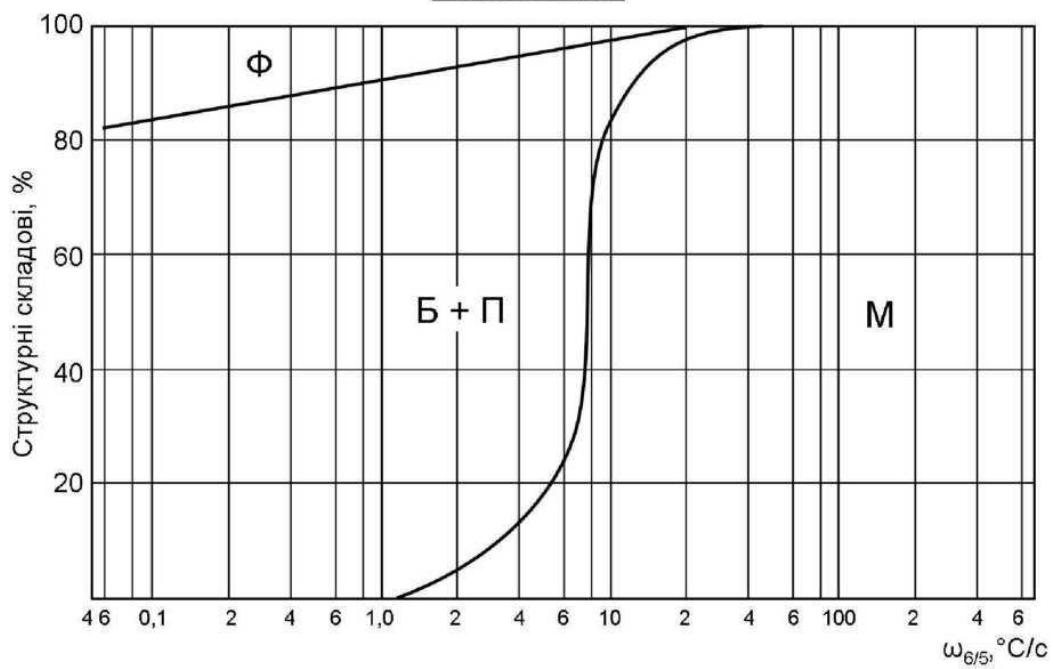
Сталь 12ХГСМФ



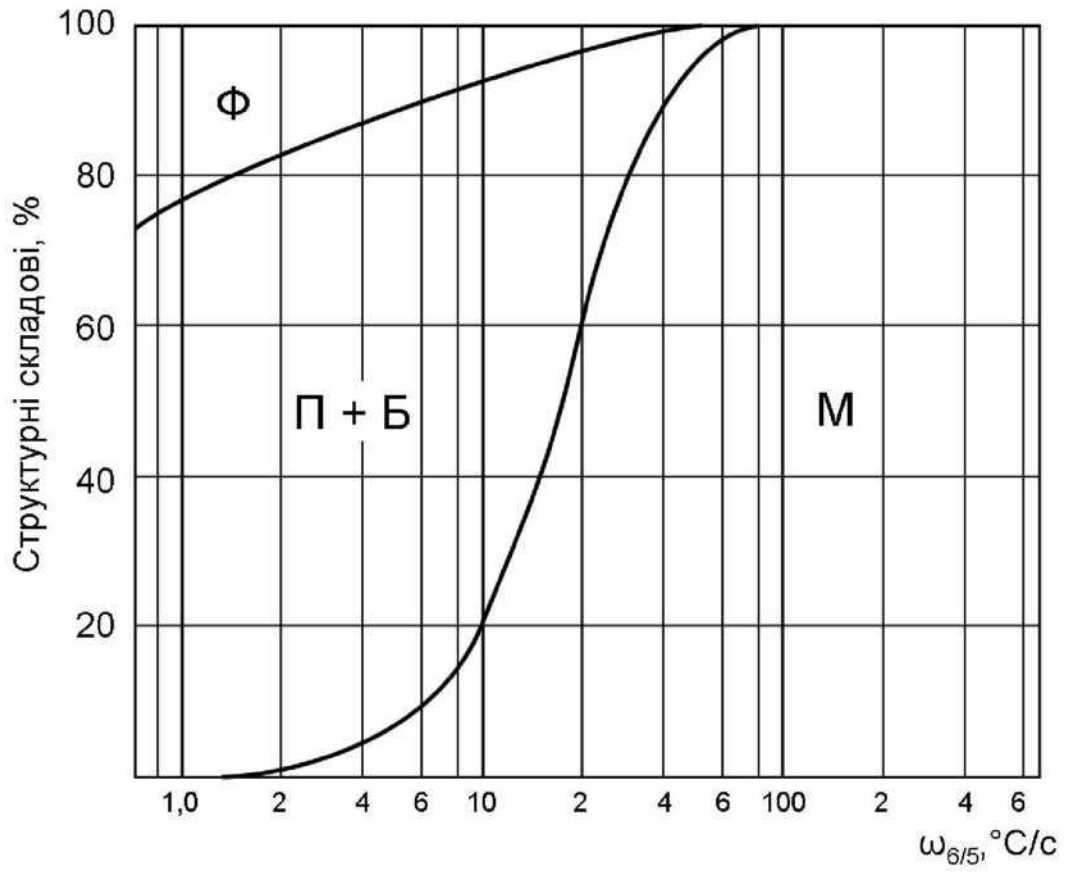
Сталь 45ХНМТА



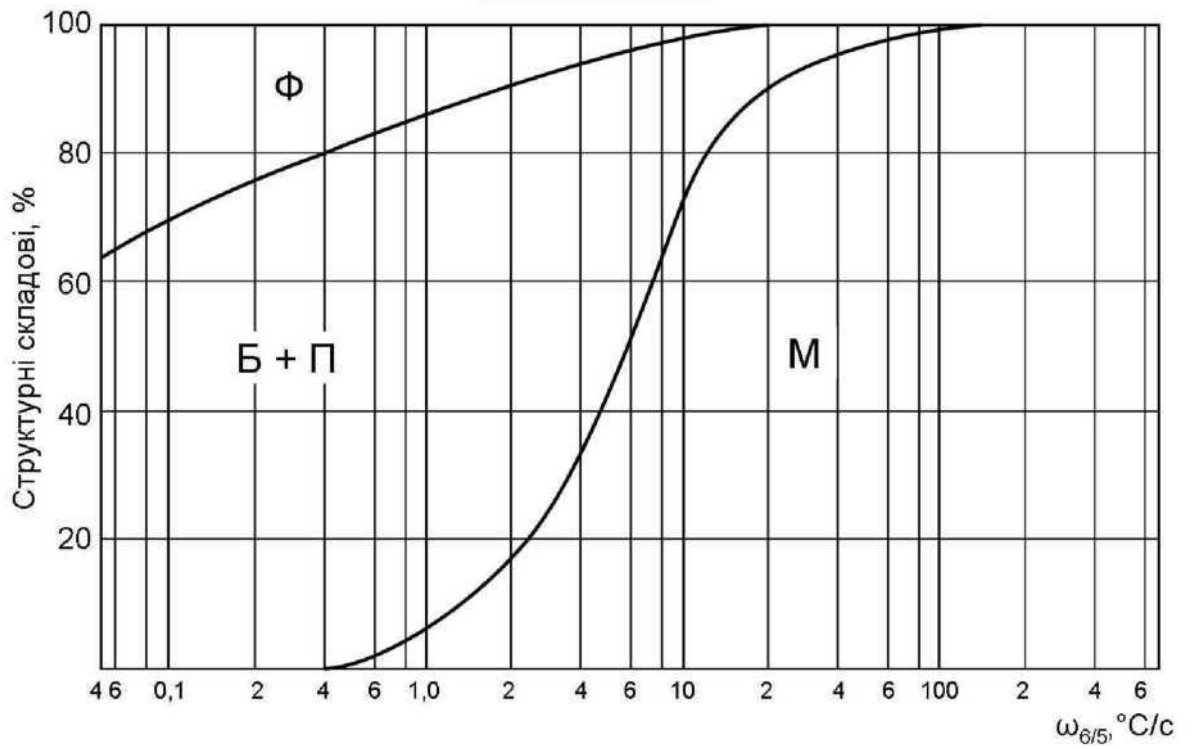
Сталь 36СГНА



Сталь 12ХН2



Сталь 35ХВФА



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

До друку дозволяю

проф. Мигущенко Р.П.

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
З КУРСУ «ЗДАТНІСТЬ ДО ЗВАРЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ
МАТЕРІАЛІВ»**

для студентів напрямку 6. 050504 «Зварювання»

Затверджено
редакційно-видавничою
радою НТУ «ХПІ»,
протокол №2 від 25.06.2021 р.

Харків 2021

