

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ЗВАРЮВАННЯ ВИСОКОМІЩНИХ СТАЛЕЙ ПРАКТИКУМ

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня магістра за освітніми
програмами «Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій»
та «Прикладна механіка» спеціальності 131 Прикладна механіка

Укладач: О. А. Сливінський

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

Рецензент *Позняков В. Д., д-р техн. наук, член-кореспондент НАН України, Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона*

Відповідальний

Редактор *Квасницький В. В., д-р техн. наук, проф.*

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(Протокол № 3 від 01.12.2022 р.)
За поданням Вченої ради Навчально-наукового інституту
матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона
(Протокол № 10/22 від 28.11.2022 р.)*

Навчальний посібник містить інструктивно-методичні рекомендації з підготовки та проведення практичних занять з навчальної дисципліни «Зварювання високоміцних сталей». Наведено короткі теоретичні відомості, методику розв’язання типових задач та завдання для самостійної роботи за тематикою розрахункового аналізу властивостей та зварності високоміцних сталей різного хімічного складу.

Призначений для здобувачів ступеня магістра за освітніми програмами «Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій» та «Прикладна механіка» спеціальності 131 Прикладна механіка очної та заочної форми навчання.

Реєстр. № НП 22/23-282. Обсяг 2,2 авт. арк.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua/>

Свідectво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

ЗМІСТ

Вступ	3
Практичні заняття	5
1. Розрахунок температури попереднього підігрівання при зварюванні нелегованих, дрібнозернистих та низьколегованих сталей підвищеної міцності	5
2. Розрахунок температури попереднього підігрівання при зварюванні високоміцних конструкційних сталей з границею пластичності до 1000 МПа	16
3. Розрахунок та побудова діаграми анізотермічного перетворення аустеніту для сталі заданого складу	26
4. Розрахунок структурних діаграм та механічних властивостей металу зони термічного впливу	35
5. Розрахунок та побудова діаграм деформування для металу ЗТВ	48
6. Оцінка зварності сталі за діаграмою Гравіля	57
Список рекомендованих джерел	62
Перелік посилань	63
Додатки	64
Додаток А. Діаграми для визначення температури попереднього підігрівання	64

ВСТУП

Прагнення зменшення ваги та металоємності зварних конструкцій, зростання вимог до експлуатаційних умов виробів промислового та цивільного будівництва, важкого, транспортного та спеціального машинобудування, енергетичного сектору промисловості обумовлюють надзвичайно широкі межі застосування високоміцних сталей у сучасному зварювальному виробництві. Колони, ферми, балки будівельних споруд, в т. ч. мостів та естакад, несучі елементи морських нафто- та газодобувних платформ, елементи турбін, гідро- та турбогенераторів, вежі повітряно-генераторних станцій, стріли автокранів, рами та силові деталі вантажних автомобілів, сільськогосподарської та гірничодобувної техніки, корпуси військової бронетехніки являють собою типові приклади зварних конструкцій з високоміцних сталей.

Практичні заняття передбачені навчальними планами для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти, що вивчають вибірковий освітній компонент «Зварювання високоміцних сталей» в рамках ОПП «Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій» або ОНП «Прикладна механіка».

Метою практичних занять є поглиблення, систематизація та закріплення студентами теоретичних знань з лекційного курсу та придбання практичного досвіду із застосування сучасних розрахункових методів аналізу властивостей та зварності високоміцних сталей різного хімічного складу; відпрацювання навичок з інженерних розрахунків згідно вимог діючих міжнародних стандартів, щодо класифікації металевих матеріалів за групами та рекомендацій з їх зварювання.

Тематика практичних занять пов'язана з розрахунками температури попереднього підігрівання з урахуванням хімічного складу сталі, з'єднувальної товщини, умісту дифузійного водню в металі шва та погонної енергії зварювання; побудовою діаграми анізотермічного перетворення аустеніту для сталі заданого складу; розрахунками структурних діаграм та механічних властивостей металу зони термічного впливу (ЗТВ); а також розрахунками та побудовою діаграм деформування для металу ЗТВ.

Однією з проблем зварювання високоміцних легованих сталей є деградація властивостей металу зони термічного впливу (ЗТВ) зварних з'єднань. Під впливом зварювального тепла найбільш небажаного характеру набувають процеси у ділянках перегріву та відпуску ЗТВ.

Структурно-фазові перетворення у ділянці перегріву характеризуються збільшенням розміру аустенітного зерна та розвитком високотемпературної хімічної мікронеоднорідності під час перебування металу за температур вище 1250...1300 °С, а при подальшому охолодженні – бездифузійним характером перекристалізації з утворенням гартівної структури. Наслідком вказаних процесів є підвищена загроза виникнення холодних тріщин в полі залишкових зварювальних напружень.

В свою чергу, зменшенням показників міцності та твердості у порівнянні з основним металом у стані поставки, характеризується метал ділянки відпуску, кінцева структура якого через відносно тривале перебування в інтервалі температур біля 400...700 °С являє собою суміш структур відпуску.

Складність розробки технології зварювання конструкцій з високоміцних легованих сталей полягає в необхідності такого регулювання термічного циклу зварювання (ТЦЗ), який з одного боку, для уникнення холодних тріщин, забезпечував би структуру металу навколошовної ділянки з підвищеною пластичністю, а з іншого боку – не спричиняв би суттєвого зменшення твердості та міцності металу ЗТВ нижче мінімально допустимих значень, передбаченими умовами експлуатації зварного виробу. Розроблення науково обґрунтованих технологічних рішень зазначеної проблеми потребує побудови термодинамічних діаграм розпаду переохолодженого аустеніту, вивчення кінетики фазових перетворень, особливостей формування структури в металі ЗТВ та визначення його основних механічних властивостей за різних параметрів теплового режиму зварювання.

Дане навчальне видання служить інструктивно-методичним матеріалом для підготовки студентів до практичних занять з дисципліни «Зварювання високоміцних сталей», містить сукупність практичних завдань та вправ з навчальної дисципліни, які сприяють засвоюванню набутих знань, формуванню умінь і навичок.

ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ

1. Розрахунок температури попереднього підігрівання при зварюванні нелегованих, дрібнозернистих та низьколегованих сталей підвищеної міцності

План проведення практичного заняття

1. Ознайомитись з теоретичними відомостями.
2. Розглянути приклад вирішення типового завдання.
3. Відповідно до свого варіанту самостійно розв'язати задане завдання, для чого:
 - а) визначити вуглецевий еквівалент;
 - б) визначити водневий показник;
 - в) визначити загальну товщину з'єднуваних деталей;
 - г) розрахувати погонну енергію зварювання;
 - д) визначити мінімальну температуру попереднього підігрівання.
4. Проаналізувати отриманні данні та знайти значення погонної енергії зварювання Q , кДж/мм, що дозволить не виконувати підігрівання.
5. Оформити та здати роботу.

Теоретичні відомості

Загальновідомим заходом запобігання холодним тріщинам є попереднє підігрівання зварюваних деталей до більш високих температур, щоб уповільнити охолодження металу зварювальної зони і таким чином уникнути виникнення в ньому надмірної кількості гартівних структур, сприяти більш ефективному витоку водню після зварювання та зменшити рівень залишкових напружень.

Мінімальна температура перед початком зварювання, нижче якої не повинна охолоджуватись область зварного шва до завершення зварювальних робіт називається *температурою попереднього підігрівання*, $T_{\text{п}}$. У випадку багатопрохідного зварювання термін, який також використовується для цієї температури стосовно другого та всіх наступних проходів називається між-

валіковою температурою. Ці температури, як правило, ідентичні. Тому з міркувань простоти далі використовується лише термін «температура попереднього підігрівання».

Нижченаведений метод розрахунку температури попереднього підігрівання за рекомендаціями ДСТУ ISO/TR 17671-2 застосовується для сталей наступного хімічного складу (%):

- вуглець 0,05...0,25,
- кремній макс. 0,8,
- марганець макс. 1,7,
- хром макс. 0,9,
- мідь макс. 1,0,
- нікель макс. 2,5,
- молібден макс. 0,75,
- ванадій макс. 0,20;

та якщо вуглецевий еквівалент CE знаходиться в межах 0,30...0,70 %.

У разі наявності в складі сталі тільки вуглецю та марганцю до розрахованого значення вуглецевого еквіваленту CE додають 0,03.

Метод не може застосовуватись до сталей мікролегованих бором !

Якщо з'єднувані матеріали мають різний хімічний склад, розрахунок температури попереднього підігрівання зварного з'єднання слід проводити для сталі з найбільшим значенням вуглецевого еквіваленту CE .

Метод передбачає застосування спеціалізованих діаграм (Додаток А), виходячи з попередньо визначених параметрів:

- умісту дифузійного водню HD в металі зварного з'єднання;
- загальної товщини з'єднаних деталей;
- погонної енергії зварювання.

1. Визначення вуглецевого еквіваленту.

Вуглецевий еквівалент CE розраховується за формулою:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}, \quad (1.1)$$

тут і далі для усіх формул вуглецевого еквіваленту C, Mn, ..., Cu – концентрація відповідних легувальних елементів у сталі, %.

2. Визначення водневого показника.

Процеси насичення металу шва воднем з газової, шлакової та металевої фаз, його подальшого розповсюдження в ході термодифузії та нерівномірного нагромадження в металі зони термічного впливу збільшують рівень залишкових напружень та сприяють утворенню холодних тріщин.

Попри вживання усіх стандартних заходів з попереднього усунення джерел водню в реакційній зоні зварювання (видалення з поверхні зварюваних крайок та зварювального дроту іржі, мастил, органічних забруднень, прожарювання зварювальних матеріалів), повністю уникнути наявності водню в металі шва не вдається. При цьому основним джерелом дифузійно-рухомого водню в металі шва є зварювальні матеріали, здатні нагромаджувати атмосферну вологу під час зберігання.

Відповідно до алгоритму визначення температури попереднього підігрівання, має бути призначений водневий показник (табл. 1.1), в залежності від умісту дифузійного водню HD в наплавленому металі. В свою чергу, уміст дифузійного водню HD визначається експериментально, згідно ДСТУ EN ISO 3690, зазначається виробником зварювальних матеріалів або приблизно обирається за даними таблиці 1.1, залежно від способу зварювання та зварювальних матеріалів.

Таблиця 1.1. Вихідні дані для вибору водневого показника [1]

Уміст дифузійного водню в наплавленому металі HD , мл/100 г	Водневий показник	Спосіб зварювання (орієнтовно)
> 15	A	Зварювання штучними електродами з рутиловим або органічним покриттям
$10 \leq 15$	B	Зварювання штучними електродами з основним покриттям, зварювання порошковим дротом
$5 \leq 10$	C	Зварювання під флюсом

Уміст дифузійного водню в наплавленому металі HD , мл/100 г	Водневий показник	Спосіб зварювання (орієнтовно)
$3 \leq 5$	D	Зварювання у захисному газі дротом суцільного перетину
≤ 3	E	Зварювання в інертному газі вольфрамовим електродом, плазмове зварювання

3. Визначення загальної товщини з'єднаних деталей.

Загальну товщину слід визначати як суму товщин з'єднаних деталей, усереднену на відстані 75 мм від осі зварного шва у випадку деталей змінної товщини (рис. 1). Цей параметр враховує умови вільного охолодження виробу після зварювання.

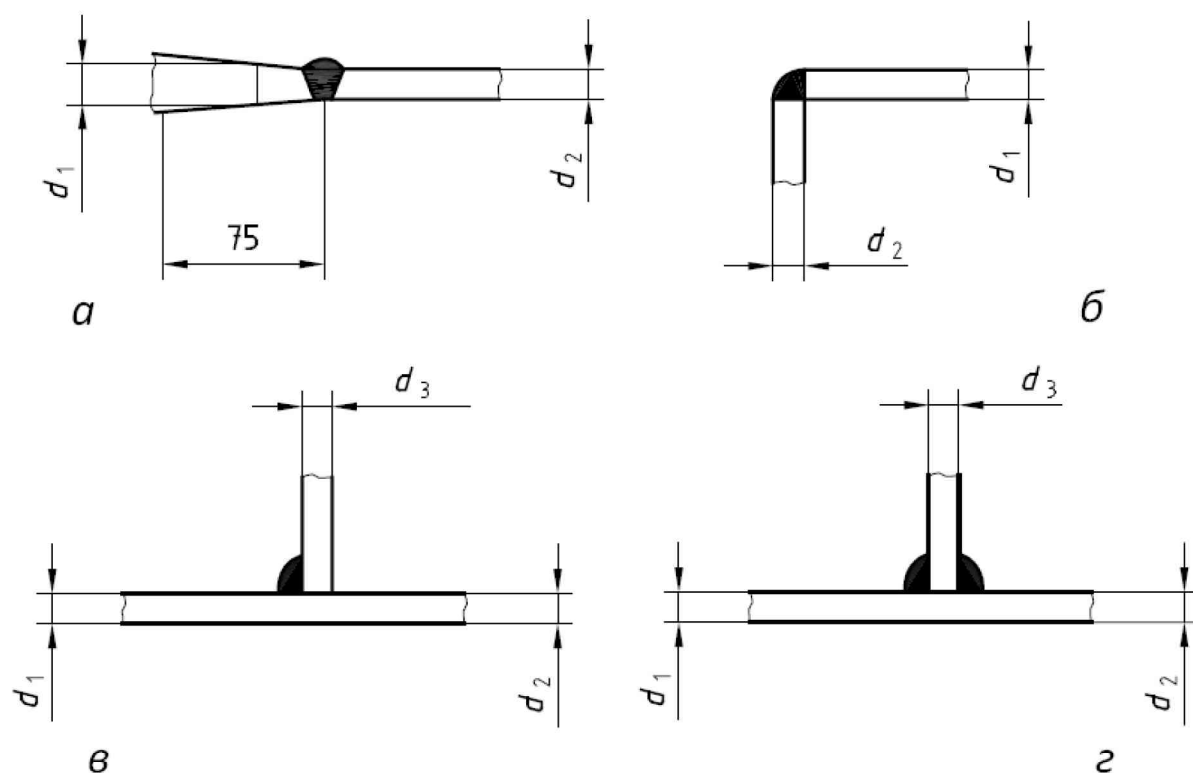


Рис. 1. Приклади визначення загальної товщини з'єднаних деталей для: а – стикового; б – кутового; в, г – таврового зварних з'єднань [1]

Залежно від типу зварного з'єднання та форми з'єднуваних деталей, загальна товщина d дорівнює:

$$- d = d_1 + d_2 \text{ (рис. 1 а, б),}$$

де d_1 – середнє значення товщини на відстані 75 мм від осі шва для варіанту на рис. 1 а;

– $d = d_1 + d_2 + d_3$ (рис. 1 в, також застосовується для двосторонніх швів, виконаних послідовно);

– $d = 0,5 \cdot (d_1 + d_2 + d_3)$ (рис. 1 г, тільки у разі одночасного виконання обох швів).

4. Розрахунок погонної енергії зварювання.

Числове значення погонної енергії зварювання Q [кДж/мм] згідно вимог ДСТУ ISO/TR 17671-1 слід розраховувати за рівнянням:

$$Q = k \frac{UI}{v} \cdot 10^{-3}, \quad (1.2)$$

де k – ефективний ККД дуги (див. табл. 1.2); U – напруга дуги, В; I – зварювальний струм, А; v – швидкість зварювання, мм/с.

Таблиця 1.2. Значення ефективного ККД дуги для різних способів зварювання, згідно ДСТУ ISO/TR 17671-1

Код способу зварювання (ДСТУ ISO 4063)	Спосіб зварювання	Ефективний ККД дуги, k
121	Під флюсом	1,0
111	Штучним покритим електродом	0,8
131	В інертному газі дротяним електродом	0,8
135	В активному газі дротяним електродом	0,8
114	Самозахисним порошковим дротом	0,8
136	В активному газі порошковим дротом	0,8
132	В інертному газі порошковим дротом	0,8
141	В інертному газі вольфрамовим електродом	0,6
15	Плазмове	0,6

Необхідна мінімальна температура попереднього підігрівання (міжваликова температура для багатопрохідних швів) визначається графічно за допомогою діаграми (див. додаток А), що відповідає розрахованому значенню вуглецевого еквіваленту CE основного металу та обраному водневому показнику. Якщо діаграма для вибраного водневого показника та розрахованого значення CE відсутня, застосовується діаграма, що відповідає наступному більшому значенню вуглецевого еквівалента при тому ж самому водневому показнику. Наприклад, якщо обрано водневий показник С, а розраховане значення $CE = 0,46$, слід обрати діаграму для $CE = 0,47$ (рис. 3А, Додаток А).

У випадку багатопрохідних зварних швів, що виконуються на різних параметрах режиму, температуру попереднього підігрівання слід визначати для зварного валика з найменшою розрахованою погонною енергією. Зазвичай вона відповідає кореневому проходу.

Приклад вирішення типового завдання

Завдання: Користуючись діаграмами (Додаток А) визначити для заданих умов:

- 1) температуру попереднього підігрівання $T_{п}$, °С;
- 2) значення погонної енергії зварювання Q , кДж/мм, що дозволить не виконувати підігрівання.

Умови: виконується механізоване дугове зварювання в суміші $Ar + CO_2$ дротяним електродом (спосіб зварювання – 135) стикового з'єднання (рис. 2) двох деталей однакової товщини: $d_1 = d_2 = 25$ мм.

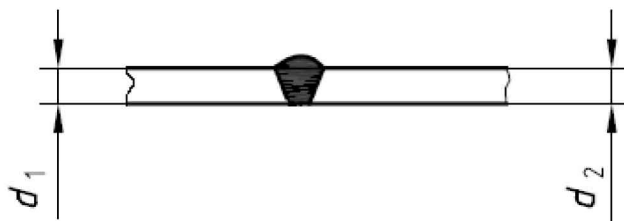


Рис. 2. Ескіз зварного з'єднання

Матеріал обох деталей – сталь хімічного складу: C = 0,12%; Mn = 1,5%; Cr = 0,8%; Ni = 1,0 %; V = 0,04%.

Параметри режиму зварювання кореня шва:

$$U = 18,4 \text{ В};$$

$$I = 195 \text{ А};$$

$$v = 3 \text{ мм/с}.$$

Розв'язок: для визначення температури попереднього підігрівання послідовно виконуємо наступні дії.

1. За формулою (1.1) розраховуємо вуглецевий еквівалент основного металу:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} = 0,12 + \frac{1,5}{6} + \frac{0,8 + 0,04}{5} + \frac{1}{15} \approx 0,60.$$

2. За даними таблиці 1.1 обираємо водневий показник. Оскільки у вихідних умовах не наведено даних про вміст дифузійного водню в наплавленому металі, обираємо водневий показник D, що орієнтовно відповідає заданому способу зварювання – у захисному газі металевим електродним дротом.

3. Визначаємо загальну товщину з'єднаних деталей. Для наданого ескізу стикового з'єднання вона дорівнює:

$$d = d_1 + d_2 = 25 + 25 = 50 \text{ [мм]}.$$

4. За формулою (1.2) розраховуємо найменшу погонну енергію багато-прохідного зварювання заданого з'єднання, попередньо обравши значення ефективного ККД дуги за даними таблиці 1.2. Для нашого випадку це буде погонна енергія виконання кореневого проходу:

$$Q = k \frac{UI}{v} \cdot 10^{-3} = 0,8 \frac{18,4 \cdot 195}{3} \cdot 10^{-3} \approx 1 \left[\frac{\text{кДж}}{\text{мм}} \right].$$

5. З Додатку А обираємо діаграму, що відповідає розрахованому значенню вуглецевого еквіваленту $CE = 0,60$ та водневому показнику D (рис. 3).

На осі абсцис діаграми знаходимо точку, що відповідає розрахованій погонній енергії $Q = 1 \text{ кДж/мм}$. Вздовж осі ординат відкладаємо значення загальної товщини з'єднаних деталей $d = 50 \text{ мм}$. Проводимо перпендикуляри від знайдених на координатних осях точок до їх взаємного перетину в полі

діаграми. Точка перетину перпендикулярів вказує на необхідну температуру попереднього підігрівання. Вона знаходиться приблизно посередині між мінімальними температурами підігрівання 125 та 150 °С. На практиці створену температуру попереднього підігрівання складно утримати постійною (відразу після завершення нагрівання тіла завжди починається його охолодження). Крім того, сам наведений метод графічного визначення температури підігрівання доволі наближений. Тому встановлену за діаграмою мінімальну необхідну температуру попереднього підігрівання округляємо до десятків. Відповідь: $T_{\text{п}} = 140^{\circ}\text{C}$.

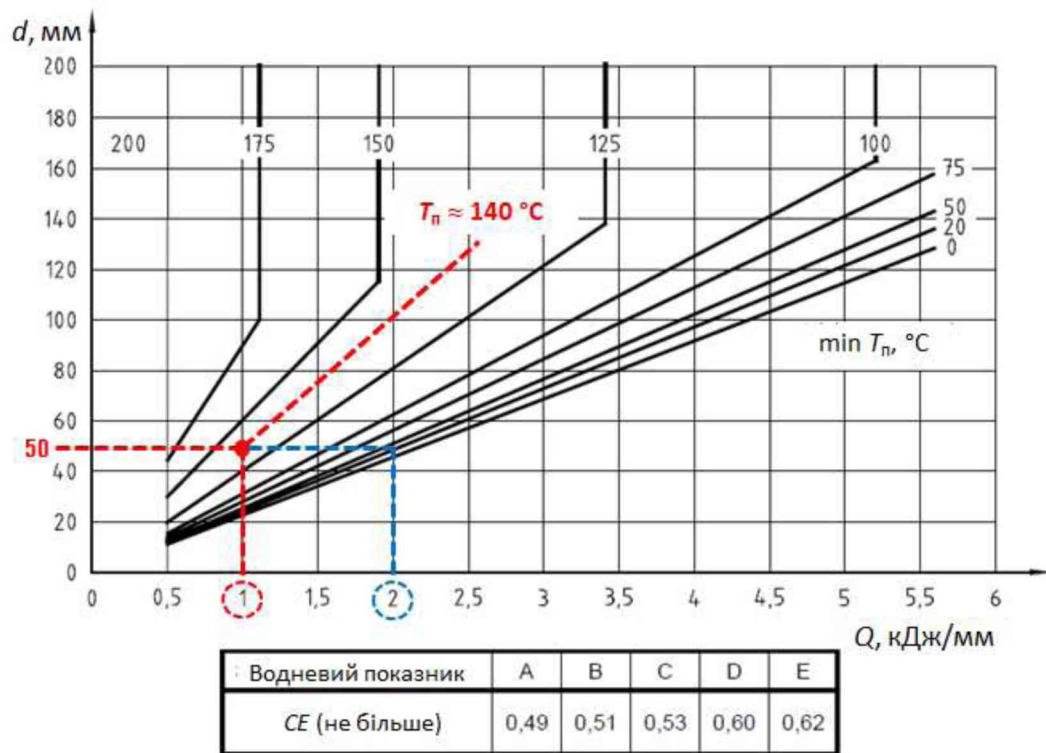


Рис. 3. Визначення мінімальної температури попереднього підігрівання ($\min T_{\text{п}}$) за допомогою діаграми

За допомогою діаграми (рис. 3) можна також встановити, за якого значення погонної енергії Q допускається зварювання виробу, що розглядається, без попереднього підігрівання. Для цього слід подовжити перпендикуляр від точки на осі ординат, яка відповідає розрахованій загальній з'єднуваній товщині d до його перетину з лінією на діаграмі, що

відповідає мінімальній температурі підігрівання $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, тобто стандартним температурним умовам. Від знайденої точки перетину опускаємо перпендикуляр на вісь абсцис і знаходимо шукану погонну енергію, що для даного випадку дорівнює $Q = 2\text{ кДж/мм}$.

Завдання для самостійної роботи

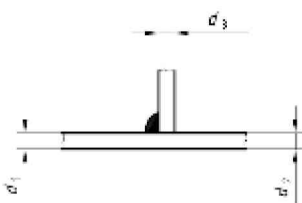
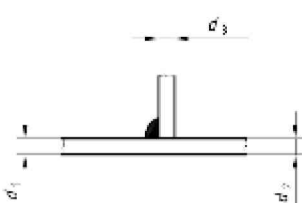
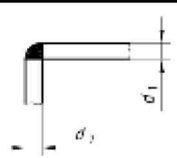
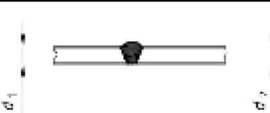
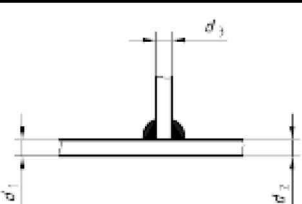
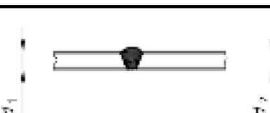
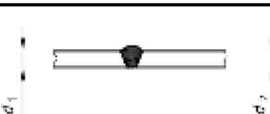
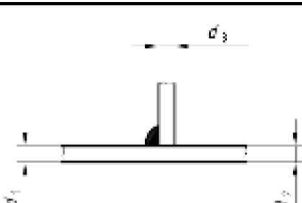
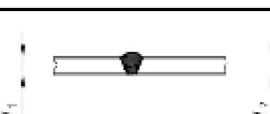
Користуючись діаграмами (Додаток А) визначити для заданих нижче умов (табл. 1.3, 1.4):

- 1) температуру попереднього підігрівання $T_{\text{п}}$, $^{\circ}\text{C}$;
- 2) значення погонної енергії зварювання Q , кДж/мм, що дозволить не виконувати підігрівання.

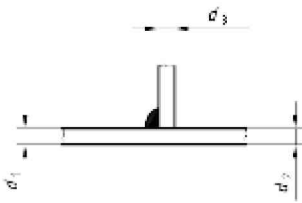
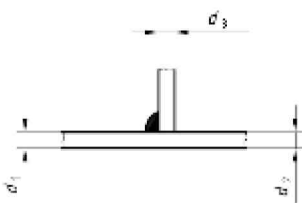
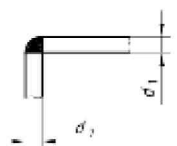
Таблиця 1.3. Хімічний склад основного металу

Варіант	Хімічний склад сталі, %						
	C	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Cu
1	0,09	1,20	0,24	0,03	0,06	0,08	0,42
2	0,11	1,09	0,29	-	0,09	0,44	0,15
3	0,13	1,10	0,78	-	0,10	-	0,52
4	0,24	1,45	-	-	-	-	0,38
5	0,14	1,33	0,20	0,06	0,11	0,80	0,22
6	0,16	0,98	0,23	0,10	0,09	0,45	0,27
7	0,18	1,44	0,25	0,15	0,12	0,76	0,39
8	0,19	1,13	0,55	-	-	0,62	0,49
9	0,22	1,53	-	-	-	-	0,35
10	0,15	1,26	0,28	0,04	0,13	0,78	0,33
11	0,12	1,46	0,30	0,10	0,03	0,26	0,40
12	0,20	1,52	-	-	-	-	-

Таблиця 1.4. Варіанти завдань для самостійної роботи

Варі- ант	Тип з'єднання	Розміри, мм	Спосіб зварювання	U , В	I , А	v , мм/с
1		$d_1 = d_2 = 25$ $d_3 = 10$	111 (рутилове покриття)	20	140	2,2
2		$d_1 = d_2 = d_3 = 30$	136	20,3	205	3,6
3		$d_1 = 40$ $d_2 = 50$	135	19,7	200	3,5
4		$d_1 = 20$ $d_2 = 25$	111 (основне покриття)	21,2	155	2,3
5		$d_1 = d_2 = 40$ $d_3 = 22$	135	18,9	193	5,2
6		$d_1 = d_2 = 20$	111 (рутилове покриття)	18,8	125	2,4
7		$d_1 = d_2 = 10$	141	10	180	2,1
8		$d_1 = d_2 = 40$ $d_3 = 30$	121	34	385	6,8
9		$d_1 = d_2 = 40$	121	28	275	6

Продовження табл. 1.4.

Варі- ант	Тип з'єднання	Розміри, мм	Спосіб зварювання	U , В	I , А	v , мм/с
10		$d_1 = d_2 = d_3 = 25$	135	21	205	3,4
11		$d_1 = d_2 = 20$ $d_3 = 10$	114	18,7	165	2,6
12		$d_1 = d_2 = 30$	141	12	190	2,5

2. Розрахунок температури попереднього підігрівання при зварюванні високоміцних конструкційних сталей з границею плинності до 1000 МПа

План проведення практичного заняття

1. Ознайомитись з теоретичними відомостями.
2. Розглянути приклад вирішення типового завдання.
3. Відповідно до свого варіанту самостійно розв'язати задане завдання, для чого:
 - а) визначити вуглецевий еквівалент;
 - б) розрахувати погонну енергію зварювання;
 - в) розрахувати температуру попереднього підігрівання для різних значень концентрації дифузійного водню в металі зварного з'єднання.
4. Проаналізувати отриманні данні та побудувати графічну залежність температури попереднього підігрівання від концентрації дифузійного водню.
5. Оформити та здати роботу.

Теоретичні відомості

Згідно ДСТУ ISO/TR 17671-2 для конструкційних сталей груп 1-4 за ДСТУ CEN ISO/TR 15608, до яких відносяться і високоміцні конструкційні сталі з границею плинності до 1000 МПа, з метою уникнення холодних тріщин при зварюванні повинна бути розрахована температура попереднього підігрівання $T_{\text{п}}$, з урахуванням:

- 1) хімічного складу сталі,
- 2) з'єднувальної товщини,
- 3) умісту дифузійного водню,
- 4) погонної енергії зварювання.

Нижченаведена методика розрахунку температури попереднього підігрівання $T_{\text{п}}$ розроблена за результатами чисельних досліджень тріщиноутворення при зварюванні сталей, схильних до загартовування, в т.ч. експеримен-

тальних випробувань їх опірності до холодних тріщин. Вона може бути застосована до зварних з'єднань зі стиковими та кутовими швами.

У разі зварного з'єднання деталей різної товщини, розрахунок температури підігрівання T_{Π} проводиться для більш товстої деталі.

1. Вплив хімічного складу сталі на температуру підігрівання.

Вплив хімічного складу сталі на її схильність до утворення холодних тріщин задається показником вуглецевого еквіваленту, CET . Ця формула враховує вплив окремих легувальних елементів на тріщиностійкість сталі у порівнянні з вуглецем:

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40}. \quad (2.1)$$

Формулу (2.1) коректно застосовувати для сталей наступного хімічного складу (%):

- вуглець 0,05...0,32,
- кремній макс. 0,8,
- марганець 0,5...1,9,
- хром макс. 1,5,
- мідь макс. 0,7,
- молібден макс. 0,75,
- ніобій макс. 0,06,
- нікель макс. 2,5,
- титан макс. 0,12,
- ванадій макс. 0,18,
- бор макс. 0,005.

Між вуглецевим еквівалентом CET і температурою підігрівання T_{Π} (або міжваликовою температурою) існує лінійний зв'язок, як показано на рис. 4.

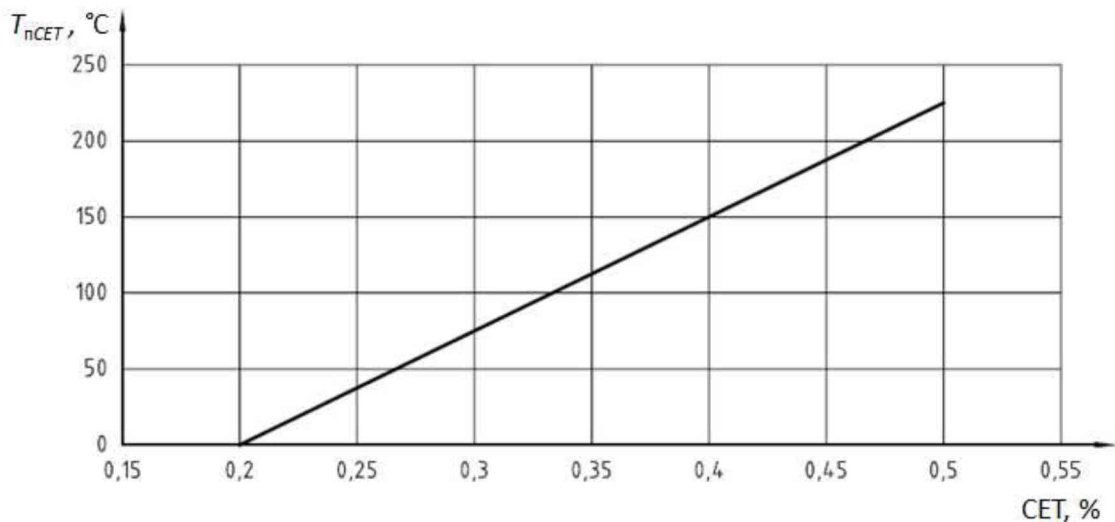


Рис. 4. Залежність температури підігрівання від вуглецевого еквіваленту [1]

Можна бачити, що збільшення приблизно на 0,01% CET призводить до збільшення температури підігрівання приблизно на 7,5 $^\circ\text{C}$:

$$T_{псЕТ} = 750 CET - 150 [^\circ\text{C}].$$

2. Вплив товщини деталей на температуру підігрівання.

Зв'язок між товщиною з'єднуваних деталей d та температурою підігрівання $T_{п}$ наведено на рис. 5. Можна бачити, що температура попереднього підігрівання чутлива до товщини зварюваних виробів у разі їх відносно невеликого значення. Проте при зростанні товщини матеріалу цей ефект зменшується так, що товщина виробу більше 60 мм слабо впливає на температуру підігрівання $T_{п}$.

Аналітично вплив товщини виробу на температуру підігрівання описується рівнянням:

$$T_{пd} = 160 \operatorname{th}(d/35) - 110 [^\circ\text{C}],$$

де $\operatorname{th}(\dots)$ – гіперболічний тангенс від аргументу в дужках, d – з'єднувальна товщина, мм.

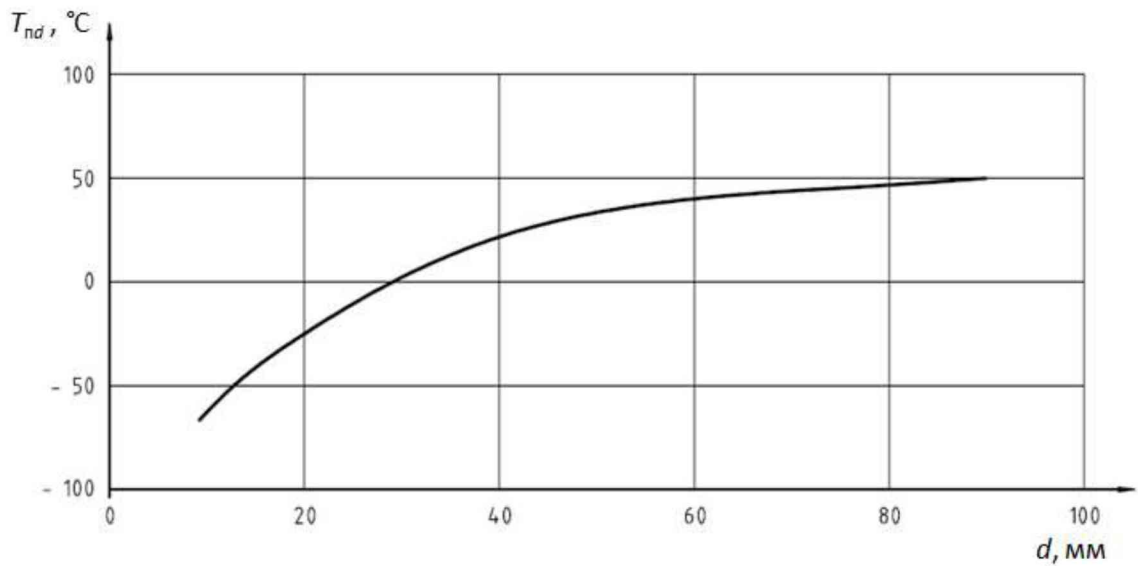


Рис. 5. Залежність температури підігрівання від товщини з'єднуваних деталей [1]

3. Вплив концентрації водню на температуру підігрівання.

Вплив визначеного згідно ДСТУ EN ISO 3690 умісту дифузійного водню HD в металі зварного з'єднання, на температуру підігрівання показано на рис. 6. Видно, що збільшення вмісту водню вимагає збільшення температури підігрівання. Приріст вмісту водню має більший вплив на температуру підігрівання при менших його концентраціях, ніж при високих.

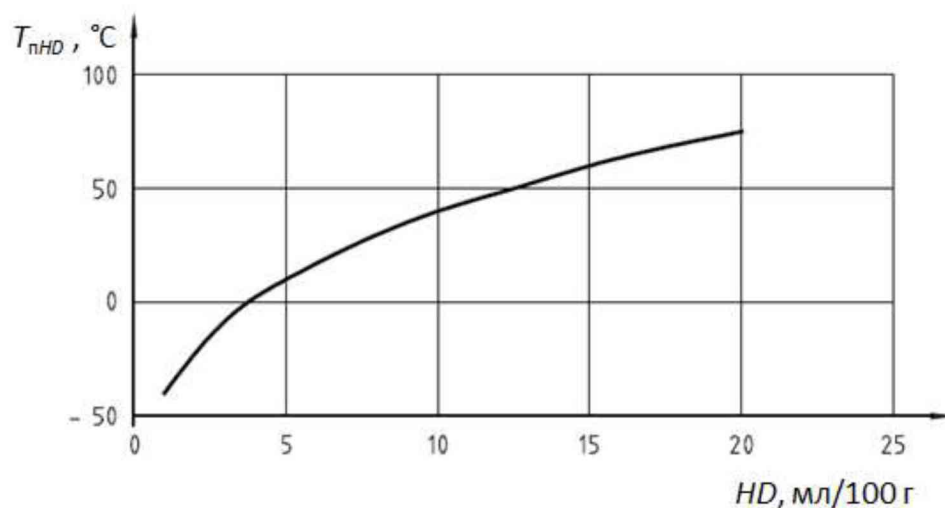


Рис. 6. Залежність температури підігрівання від умісту дифузійного водню [1]

Аналітично вплив концентрації дифузійного водню на температуру підігрівання описується рівнянням:

$$T_{\text{пHD}} = 62 HD^{0,35} - 100 [^{\circ}\text{C}],$$

де HD – концентрація дифузійного водню, мл/100 г.

4. Вплив погонної енергії зварювання на температуру підігрівання

Вплив погонної енергії Q на температуру підігрівання наведено на рис. 7. Збільшення погонної енергії зварювання дозволяє зменшити температуру підігрівання. Цей ефект значно посилюється для сталей з невеликими значеннями вуглецевого еквіваленту, як такими, що є менш схильними до загартування під впливом зварювального термічного циклу, ніж сталі з більшим значенням вуглецевого еквіваленту.

Аналітично вплив погонної енергії зварювання на температуру підігрівання описується рівнянням:

$$T_{\text{pQ}} = Q (53CET - 32) - 53CET + 32 (^{\circ}\text{C}),$$

де Q – погонна енергія зварювання, кДж/мм.

Числове значення погонної енергії зварювання слід розраховувати за рівнянням (1.2) згідно вимог ДСТУ ISO/TR 17671-1.

5. Розрахунок температури попереднього підігрівання

З урахуванням сумісного впливу розглянутих вище факторів рівняння для розрахунку температури попереднього підігрівання прийме вид:

$$T_{\text{п}} = T_{\text{пCET}} + T_{\text{пd}} + T_{\text{пHD}} + T_{\text{пQ}},$$

або

$$T_{\text{п}} = 697CET + 160\text{th}(d/35) + 62HD^{0,35} + Q (53CET - 32) - 328, \quad (2.2)$$

де $T_{\text{п}}$ – температура попереднього підігрівання, $^{\circ}\text{C}$; CET – вуглецевий еквівалент, %; d – товщина з'єднуваних деталей, мм; HD – концентрація дифузійного водню в металі зварного з'єднання, мл/100 г; Q – погонна енергія зварювання, кДж/мм.

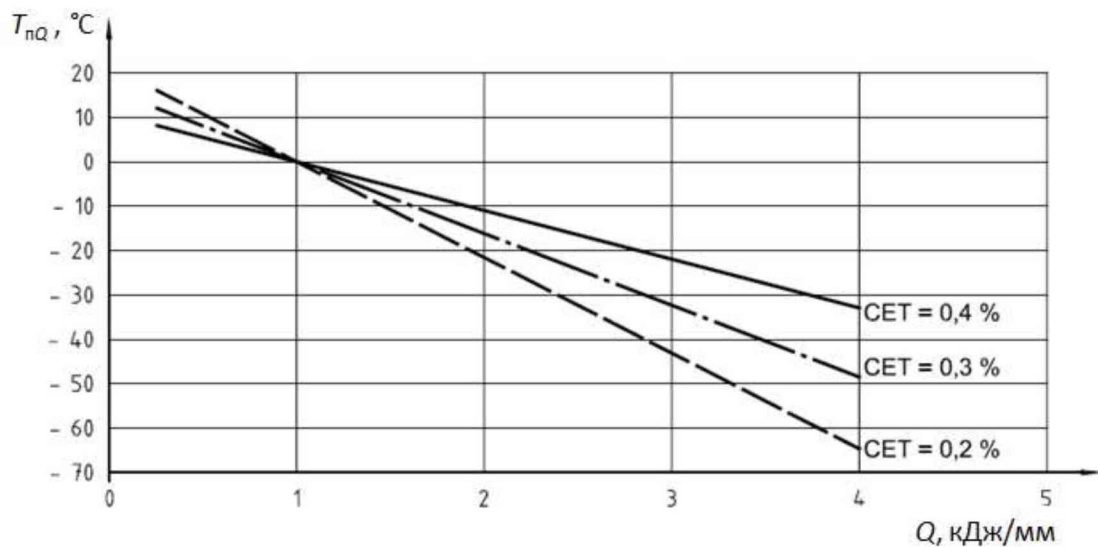


Рис. 7. Залежність температури підігрівання від погонної енергії зварювання [1]

Рівняння (2.2) коректне для конструкційних сталей з границею плинності до 1000 МПа та:

$$CET = 0,2 \dots 0,5 \%,$$

$$d = 10 \dots 90 \text{ мм},$$

$$HD = 1 \dots 20 \text{ мл/100 г},$$

$$Q = 0,5 \dots 4,0 \text{ кДж/мм}.$$

У рівнянні (2.2) розраховується вуглецевий еквівалент CET для основного металу, якщо він перевершує вуглецевий еквівалент металу шва щонайменше на 0,03%. В протилежному випадку розрахунок температури підігрівання повинен проводитись на базі вуглецевого еквіваленту металу шва, збільшеного на 0,03%.

Приклад вирішення типового завдання

Завдання: для зварювання під флюсом сталі хімічного складу: $C = 0,2\%$; $Mn = 1,3\%$; $Mo = 0,04\%$; $Cr = 0,39\%$; $Cu = 0,01\%$; $Ni = 0,05\%$, розрахувати температуру попереднього підігрівання, якщо концентрація дифузійного водню в металі зварного з'єднання складає: 9 мл/100 г; товщина з'єднуваних деталей дорівнює 80 мм, параметри режиму зварювання: $U = 29 \text{ В}$, $I = 310 \text{ А}$, $v = 6,5 \text{ мм/с}$.

Розв'язок: для визначення температури попереднього підігрівання послідовно виконуємо наступні дії.

1. За формулою (2.1) розраховуємо вуглецевий еквівалент основного металу, враховуючий заданий хімічний склад сталі:

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} = 0,36.$$

2. За формулою (1.2) розраховуємо погонну енергію зварювання, попередньо обравши значення ефективного ККД дуги за даними таблиці 1.2. Для нашого випадку це буде погонна:

$$Q = k \frac{UI}{v} \cdot 10^{-3} = 1 \cdot \frac{29 \cdot 310}{6,5} \cdot 10^{-3} \approx 1,4 \left[\frac{\text{кДж}}{\text{мм}} \right].$$

3. За формулою (2.2) розраховуємо температуру попереднього підігрівання, враховуючи заданий уміст дифузійного водню в металі зварного з'єднання HD :

$$T_{\Pi} = 697CET + 160\text{th}(d/35) + 62HD^{0,35} + Q(53CET - 32) - 328 \approx 195 [^{\circ}\text{C}].$$

Завдання для самостійної роботи

Варіант 1. Для зварювання під флюсом (параметри – див. табл. 2.1) сталі Weldox 960 (хімічний склад – див. табл. 2.2) розрахуйте температуру попереднього підігрівання T_{Π} , якщо концентрація дифузійного водню в металі зварного з'єднання HD складає: 6; 7; 8 та 9 мл/100 г (розраховану температуру округлити до цілого). Для заданих умов зварювання побудуйте графічну залежність $T_{\Pi} = f(HD)$.

Варіант 2. Для зварювання під флюсом (параметри – див. табл. 2.1) сталі Hardox 450 (хімічний склад – див. табл. 2.2) розрахуйте температуру попереднього підігрівання T_{Π} , якщо концентрація дифузійного водню в металі зварного з'єднання HD складає: 6; 7; 8 та 9 мл/100 г (розраховану температуру округлити до цілого). Для заданих умов зварювання побудуйте графічну залежність $T_{\Pi} = f(HD)$.

Таблиця 2.1. Варіанти технологічних параметрів зварювання

Спосіб зварювання	Товщина з'єднуваних деталей d , мм	U , В	I , А	v , мм/с
121	80	29	310	6,5
135	50	21,6	245	3,4
136	35	19,7	230	3,7

Таблиця 2.2. Хімічний склад основного металу

Сталь	Хімічний склад сталі, %					
	C	Mn	Mo	Cr	Cu	Ni
Weldox 960	0,17	1,26	0,60	0,21	0,01	0,05
Hardox 450	0,20	1,30	0,04	0,39	0,01	0,05
Optim 700QL	0,16	1,01	0,21	0,61	0,02	0,22
SIDUR 450	0,18	0,72	0,16	0,41	0,24	0,18

Варіант 3. Для зварювання під флюсом (параметри – див. табл. 2.1) сталі Optim 700QL (хімічний склад – див. табл. 2.2) розрахуйте температуру попереднього підігрівання $T_{\text{п}}$, якщо концентрація дифузійного водню в металі зварного з'єднання HD складає: 6; 7; 8 та 9 мл/100 г (розраховану температуру округлити до цілого). Для заданих умов зварювання побудуйте графічну залежність $T_{\text{п}} = f(HD)$.

Варіант 4. Для зварювання під флюсом (параметри – див. табл. 2.1) сталі SIDUR 450 (хімічний склад – див. табл. 2.2) розрахуйте температуру попереднього підігрівання $T_{\text{п}}$, якщо концентрація дифузійного водню в металі зварного з'єднання HD складає: 6; 7; 8 та 9 мл/100 г (розраховану температуру округлити до цілого). Для заданих умов зварювання побудуйте графічну залежність $T_{\text{п}} = f(HD)$.

Варіант 5. Для дугового зварювання в активному газі дротяним електродом (параметри – див. табл. 2.1) сталі Weldox 960 (хімічний склад – див. табл. 2.2) розрахуйте температуру попереднього підігрівання $T_{\text{п}}$, якщо концентрація дифузійного водню в металі зварного з'єднання HD складає: 3,5; 4; 4,5 та 5

мл/100 г (розраховану температуру округлити до цілого). Для заданих умов зварювання побудуйте графічну залежність $T_{\text{п}} = f(HD)$.

Варіант 6. Для дугового зварювання в активному газі дротяним електродом (параметри – див. табл. 2.1) сталі Hardox 450 (хімічний склад – див. табл. 2.2) розрахуйте температуру попереднього підігрівання $T_{\text{п}}$, якщо концентрація дифузійного водню в металі зварного з'єднання HD складає: 3,5; 4; 4,5 та 5 мл/100 г (розраховану температуру округлити до цілого). Для заданих умов зварювання побудуйте графічну залежність $T_{\text{п}} = f(HD)$.

Варіант 7. Для дугового зварювання в активному газі дротяним електродом (параметри – див. табл. 2.1) сталі Optim 700QL (хімічний склад – див. табл. 2.2) розрахуйте температуру попереднього підігрівання $T_{\text{п}}$, якщо концентрація дифузійного водню в металі зварного з'єднання HD складає: 3,5; 4; 4,5 та 5 мл/100 г (розраховану температуру округлити до цілого). Для заданих умов зварювання побудуйте графічну залежність $T_{\text{п}} = f(HD)$.

Варіант 8. Для дугового зварювання в активному газі дротяним електродом (параметри – див. табл. 2.1) сталі SIDUR 450 (хімічний склад – див. табл. 2.2) розрахуйте температуру попереднього підігрівання $T_{\text{п}}$, якщо концентрація дифузійного водню в металі зварного з'єднання HD складає: 3,5; 4; 4,5 та 5 мл/100 г (розраховану температуру округлити до цілого). Для заданих умов зварювання побудуйте графічну залежність $T_{\text{п}} = f(HD)$.

Варіант 9. Для дугового зварювання в активному газі порошковим дротом (параметри – див. табл. 2.1) сталі Weldox 960 (хімічний склад – див. табл. 2.2) розрахуйте температуру попереднього підігрівання $T_{\text{п}}$, якщо концентрація дифузійного водню в металі зварного з'єднання HD складає: 10; 11; 12 та 13 мл/100 г (розраховану температуру округлити до цілого). Для заданих умов зварювання побудуйте графічну залежність $T_{\text{п}} = f(HD)$.

Варіант 10. Для дугового зварювання в активному газі порошковим дротом (параметри – див. табл. 2.1) сталі Hardox 450 (хімічний склад – див. табл. 2.2) розрахуйте температуру попереднього підігрівання $T_{\text{п}}$, якщо концентрація дифузійного водню в металі зварного з'єднання HD складає: 10; 11; 12 та 13

мл/100 г (розраховану температуру округлити до цілого). Для заданих умов зварювання побудуйте графічну залежність $T_{\text{п}} = f(HD)$.

Варіант 11. Для дугового зварювання в активному газі порошковим дротом (параметри – див. табл. 2.1) сталі Optim 700QL (хімічний склад – див. табл. 2.2) розрахуйте температуру попереднього підігрівання $T_{\text{п}}$, якщо концентрація дифузійного водню в металі зварного з'єднання HD складає: 10; 11; 12 та 13 мл/100 г (розраховану температуру округлити до цілого). Для заданих умов зварювання побудуйте графічну залежність $T_{\text{п}} = f(HD)$.

Варіант 12. Для дугового зварювання в активному газі порошковим дротом (параметри – див. табл. 2.1) сталі SIDUR 450 (хімічний склад – див. табл. 2.2) розрахуйте температуру попереднього підігрівання $T_{\text{п}}$, якщо концентрація дифузійного водню в металі зварного з'єднання HD складає: 10; 11; 12 та 13 мл/100 г (розраховану температуру округлити до цілого). Для заданих умов зварювання побудуйте графічну залежність $T_{\text{п}} = f(HD)$.

3. Розрахунок та побудова діаграми анізотермічного перетворення аустеніту для сталі заданого складу

План проведення практичного заняття

1. Ознайомитись з теоретичними відомостями.
2. Розглянути алгоритм вирішення типового завдання.
3. Відповідно до свого варіанту самостійно розв'язати завдання, з урахуванням заданих хімічного складу досліджуваної сталі та розміру зерна у вихідному стані.
4. Оформити та здати роботу.

Теоретичні відомості

Характер перетворення аустеніту в процесі безперервного охолодження може бути досліджений експериментальним шляхом, за допомогою термічного, мікроструктурного, дилатометричного або магнітотермічного методів. Однак ці методики потребують значних витрат часу на проведення трудомістких дослідів. Разом із цим, в теперішній час існують методи обчислювальної термодинаміки, які дозволяють проводити моделювання фізичних та механічних властивостей матеріалів за їх хімічним складом. Одним із найпоширеніших в дослідницькій практиці світу програмних комплексів для вирішення зазначено задачі є JMatPro¹ (Java-based Materials Properties software). Його робота базується на використанні методу термодинамічного розрахунку рівноважного стану системи CALPHAD (Calculation of Phase Diagrams) [2]. Програма дозволяє за хімічним складом сплаву та параметрами його термічної обробки (в т.ч. теплового режиму зварювання) провести обчислювальний експеримент та передбачити фазовий склад, хімічний склад фаз та їх об'ємну частку при різних температурах. Подальше моделювання фізичних і механічних властивостей матеріалу здійснюється на основі багатоетапного розрахункового алгоритму, що передбачає визначення ступеню впливу кожного легувального елементу чи

¹ Для виконання завдань студентами використовується некомерційна версія програми JMatPro.

домішки на властивості окремих фаз, розрахунок властивостей кожної фази, суміщення даних для окремих фаз та розрахунок властивостей вже всієї багатокомпонентної системи за правилом сумішей та фізичними законами, що встановлюють зв'язок між окремими властивостями.

Основними вихідними даними, які необхідно ввести користувачу JMatPro для одержання потрібних властивостей матеріалу є його точний хімічний склад та показник, що характеризує розмір його зерна у вихідному стані (бал зерна або середній розмір). На базі цих даних JMatPro прогнозує широкий спектр властивостей від діаграм перетворення переохолодженого аустеніту до структурних діаграм металу зварювальної зони термічного впливу (ЗТВ) та кривих деформаційного зміцнення в широкому спектрі температур та швидкостей деформації.

Алгоритм виконання роботи

Для початку роботи, необхідно через головне меню JMatPro, за допомогою команди **Material Types** задати тип досліджуваного матеріалу (наприклад **General Steel**) та його хімічний склад на табличній панелі у лівій частині екрану (рис. 8).

В правій частині екрану розміщено команди з обчислення властивостей досліджуваного матеріалу та експорту даних в інші програмні комплекси.

Для побудови термодинамічної діаграми фазових перетворень для сталі заданого складу, застосовується команда **Advanced CCT** з групи команд **Phase transformation**, що відкриває панель для введення вихідних даних до розрахунку (рис. 9).

До початку обчислень необхідно задати середній розмір зерна досліджуваної сталі та температуру аустенітизації. Середній розмір зерна (**Grain size**), за бажанням користувача, задається або у мікрометрах, або через № балу зерна за американським стандартом ASTM.

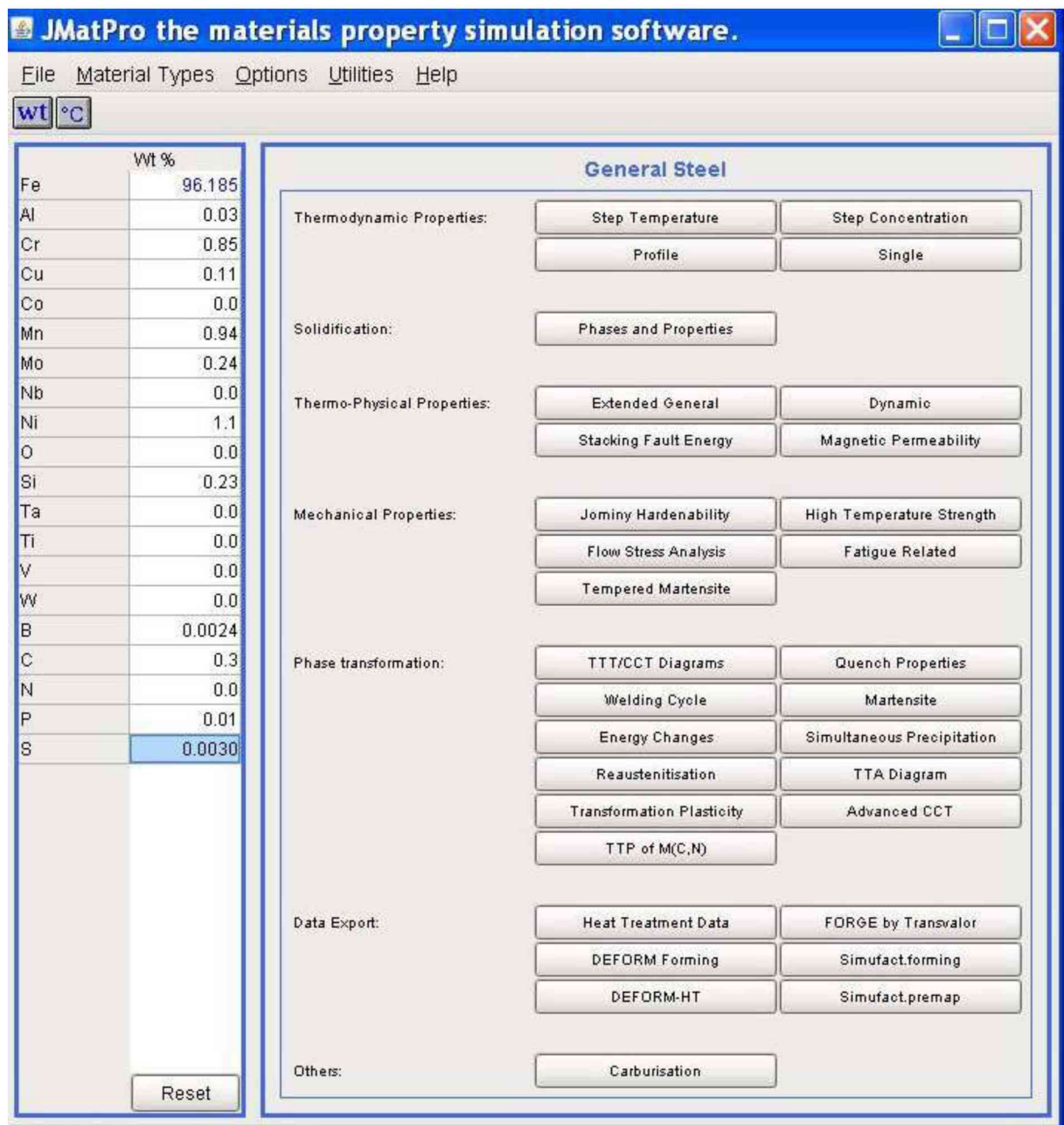


Рис. 8. Головне меню програми JMatPro

По завершенню введення вихідних даних, розрахунок запускається командою **Start calculation**. Результати розрахунку виводяться на екран у вигляді діаграм, як показано на рисунку 10.

JMatPro the materials property simula...

File Material Types Options Utilities Help

wt °C Show properties

	Wt %
Fe	96.185
Al	0.03
Cr	0.85
Cu	0.11
Co	0.0
Mn	0.94
Mo	0.24
Nb	0.0
Ni	1.1
O	0.0
Si	0.23
Ta	0.0
Ti	0.0
V	0.0
W	0.0
B	0.0024
C	0.3
N	0.0
P	0.01
S	0.0030

Reset

General Steel
Advanced CCT

Grain size

Grain size : 10 microns ?

Austenitisation temperature)

Temperature (C) 900

Cooling profile

☐ Constant ☒ Newtonian

Start calculation Help

waiting for user input...

Рис. 9. Панель вихідних даних для розрахунку термокінетичних діаграм

Збереження результатів розрахунку виконується за допомогою віртуальної кнопки з зображенням дискети у нижньому контекстному меню. Також там можна задати значення осі абсцис (загальний час охолодження від температури аустенізації або час охолодження в критичному інтервалі температур 800...500 °C), розмірність часу (секунди, хвилини, години, дні), температури (градуси Цельсія або Фаренгейта), одиниці твердості матеріалу за кінцевої температури (за Роквелом, або Вікерсом), а також здійснити масштабування та форматування побудованої діаграми.

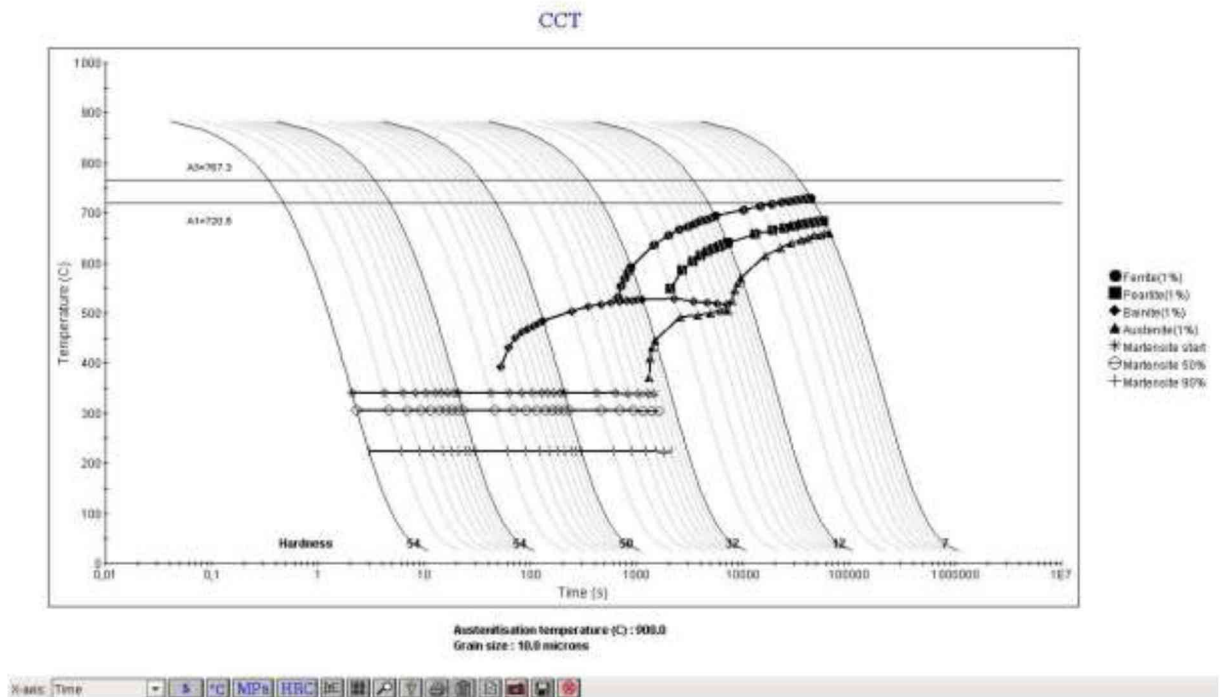


Рис. 10. Варіант розрахованої в JMatPro термокінетичної діаграми перетворення аустеніту

На рисунку 11, для прикладу, наведено термокінетичну діаграму перетворення аустеніту, аналогічну до представленої на рисунку 10, але в системі координат температура - час $t_{8/5}$, з твердістю в одиницях Вікерса.

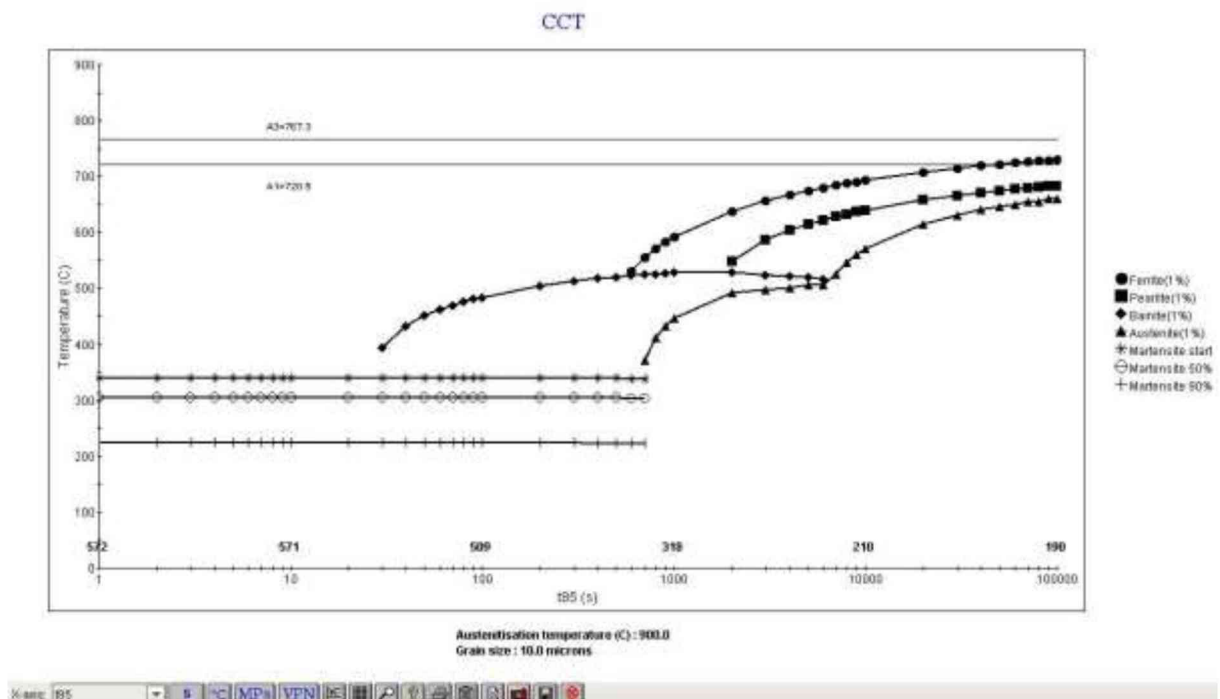


Рис. 11. Варіант представлення в JMatPro термокінетичної діаграми перетворення аустеніту

Завдання для самостійної роботи

Варіант 1. Для сталі Arмох 500Т нижченаведеного хімічного складу розрахувати та побудувати діаграму анізотермічного перетворення аустеніту, прийнявши середній розмір зерна: 10 мкм.

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	B
%, мас.	0.27	0.24	0.84	0.007	0.001	0.49	0.89	0.347	0.056	0.002

За допомогою діаграми визначити, за якого максимального значення часу охолодження в інтервалі температур 800...500 °C ($t_{8/5}$) структура сталі буде виключно мартенситною.

Варіант 2. Для сталі Armstal 500 нижченаведеного хімічного складу розрахувати та побудувати діаграму анізотермічного перетворення аустеніту, прийнявши середній розмір зерна: 10 мкм.

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	B
%, мас.	0.32	0.22	1.16	0.01	0.002	0.85	1.09	0.24	0.03	0.11	0.0021

За допомогою діаграми визначити, за якого максимального значення часу охолодження в інтервалі температур 800...500 °C ($t_{8/5}$) структура сталі буде виключно мартенситною.

Варіант 3. Для сталі Miilux 500 нижченаведеного хімічного складу розрахувати та побудувати діаграму анізотермічного перетворення аустеніту, прийнявши середній розмір зерна: 10 мкм.

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al	Ti	B
%, мас.	0.285	0.22	1.13	0.013	0.005	0.21	0.04	0.009	0.009	0.033	0.033	0.002

За допомогою діаграми визначити, за якого максимального значення часу охолодження в інтервалі температур 800...500 °C ($t_{8/5}$) структура сталі буде виключно мартенситною.

Варіант 4. Для сталі Swebor 500 нижченаведеного хімічного складу розрахувати та побудувати діаграму анізотермічного перетворення аустеніту, прийнявши середній розмір зерна: 10 мкм.

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Ti	Cu	B	N
%, мас.	0.29	0.25	1.31	0.011	0.001	0.33	0.05	0.034	0.03	0.03	0.0033	0.005

За допомогою діаграми визначити, за якого максимального значення часу охолодження в інтервалі температур 800...500 °C ($t_{8/5}$) структура сталі буде виключно мартенситною.

Варіант 5. Для сталі Arмох 440Т нижченаведеного хімічного складу розрахувати та побудувати діаграму анізотермічного перетворення аустеніту, прийнявши середній розмір зерна: 10 мкм.

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	B
%, мас.	0.19	0.22	0.85	0.008	0.001	0.6	1.91	0.586	0.036	0.002

За допомогою діаграми визначити, за якого максимального значення часу охолодження в інтервалі температур 800...500 °C ($t_{8/5}$) структура сталі буде виключно мартенситною.

Варіант 6. Для сталі Weldox 1300 нижченаведеного хімічного складу розрахувати та побудувати діаграму анізотермічного перетворення аустеніту, прийнявши середній розмір зерна: 10 мкм.

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Cu	Nb
%, мас.	0.24	0.204	0.92	0.009	0.005	0.48	1.27	0.35	0.02	0.004	0.02	0.021

За допомогою діаграми визначити, за якого максимального значення часу охолодження в інтервалі температур 800...500 °C ($t_{8/5}$) структура сталі буде виключно мартенситною.

Варіант 7. Для сталі AISI 4340 нижченаведеного хімічного складу розрахувати та побудувати діаграму анізотермічного перетворення аустеніту, прийнявши середній розмір зерна: 10 мкм.

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
%, мас.	0.39	0.24	0.61	0.021	0.006	0.67	1.46	0.17

За допомогою діаграми визначити, за якого максимального значення часу охолодження в інтервалі температур 800...500 °C ($t_{8/5}$) структура сталі буде виключно мартенситною.

Варіант 8. Для сталі Weldox 1100 нижченаведеного хімічного складу розрахувати та побудувати діаграму анізотермічного перетворення аустеніту, прийнявши середній розмір зерна: 10 мкм.

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Nb	B
%, мас.	0.17	0.24	0.84	0.012	0.003	0.56	2.0	0.6	0.028	0.02	0.021	0.002

За допомогою діаграми визначити, за якого максимального значення часу охолодження в інтервалі температур 800...500 °C ($t_{8/5}$) структура сталі буде виключно мартенситною.

Варіант 9. Для сталі Hardox 450 нижченаведеного хімічного складу розрахувати та побудувати діаграму анізотермічного перетворення аустеніту, прийнявши середній розмір зерна: 10 мкм.

За допомогою діаграми визначити, за якого максимального значення часу охолодження в інтервалі температур 800...500 °C ($t_{8/5}$) структура сталі буде виключно мартенситною.

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
%, мас.	0.19	0.52	1.4	0.007	0.001	0.26	0.04	0.011	0.002

Варіант 10. Для сталі A596 нижченаведеного хімічного складу розрахувати та побудувати діаграму анізотермічного перетворення аустеніту, прийнявши середній розмір зерна: 10 мкм.

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Cu	Al	B
%, мас.	0.29	0.35	1.72	0.015	0.004	0.5	0.5	0.63	0.028	0.35	0.026	0.002

За допомогою діаграми визначити, за якого максимального значення часу охолодження в інтервалі температур 800...500 °C ($t_{8/5}$) структура сталі буде виключно мартенситною.

Варіант 11. Для сталі MIL-A-46100C нижченаведеного хімічного складу розрахувати та побудувати діаграму анізотермічного перетворення аустеніту, прийнявши середній розмір зерна: 10 мкм.

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al
%, мас.	0.31	0.43	0.87	0.01	0.002	0.54	1.16	0.55	0.036

За допомогою діаграми визначити, за якого максимального значення часу охолодження в інтервалі температур 800...500 °C ($t_{8/5}$) структура сталі буде виключно мартенситною.

Варіант 12. Для сталі Hardox 500 нижченаведеного хімічного складу розрахувати та побудувати діаграму анізотермічного перетворення аустеніту, прийнявши середній розмір зерна: 10 мкм.

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	B
%, мас.	0.26	0.75	0.2	0.005	0.005	0.7	0.01	0.05	0.005	0.001

За допомогою діаграми визначити, за якого максимального значення часу охолодження в інтервалі температур 800...500 °C ($t_{8/5}$) структура сталі буде виключно мартенситною.

4. Розрахунок структурних діаграм та механічних властивостей металу зони термічного впливу

План проведення практичного заняття

1. Ознайомитись з теоретичними відомостями.
2. Розглянути алгоритм вирішення типового завдання.
3. Відповідно до свого варіанту самостійно розв'язати завдання, з урахуванням заданих хімічного складу досліджуваної сталі, вихідного розміру зерна та параметрів термічного циклу зварювання.
4. Оформити та здати роботу.

Теоретичні відомості

Для більш повного аналізу результатів перетворення аустеніту в навколошовній ділянці зварного з'єднання, крім анізотермічних діаграм, будують структурні діаграми в координатах: структурні складові – швидкість охолодження град/сек. Крім того, оцінка ступеню механічної неоднорідності зварного з'єднання, що спричиняється впливом певного термічного циклу зварювання, потребує визначення комплексу фізико-механічних властивостей металу окремих, мікроскопічних за розмірами, ділянок ЗТВ.

Побудова структурних діаграм та розрахунок кінцевих (за повного охолодження після зварювання) механічних властивостей металу навколошовної ділянки в JMatPro спирається на введенні, як вихідних даних до розрахунку, хімічного складу досліджуваної сталі, вихідного розміру зерна та параметрів термічного циклу зварювання.

Алгоритм виконання роботи

У головному меню програми JMatPro (рис. 8) обираємо з групи команд **Phase transformation** команду **Welding Cycle**, що відкриває панель для введення вихідних даних до розрахунку (рис. 12).

JMatPro the materials property simula...

File Material Types Options Utilities Help

wt °C Show properties

	Wt %
Fe	96.185
Al	0.03
Cr	0.85
Cu	0.11
Co	0.0
Mn	0.94
Mo	0.24
Nb	0.0
Ni	1.1
O	0.0
Si	0.23
Ta	0.0
Ti	0.0
V	0.0
W	0.0
B	0.0024
C	0.3
N	0.0
P	0.01
S	0.0030

Tutor Reset

General Steel
Welding Cycle

Grain size
Grain size : 10 microns ?

Austenitisation temperature
Temperature (C) 860

Maximum Temperature
Temperature (C) 1400

Heating
Heating rate (C/s) 200.0

Cooling rates (C/s)
Number of cooling rates: 6
5 10 15 20 25 30

Start calculation Help

waiting for user input...

Рис. 12. Панель вихідних даних для розрахунку структурних діаграм та властивостей металу зони термічного впливу

В лівій колонці панелі (рис. 12) відображається хімічний склад сталі, для якої здійснюватиметься розрахунок. Вихідні дані для початку обчислень передбачають введення середнього розміру зерна або балу зерна за ASTM, а також максимальної температури до якої нагрівається метал зони термічного впливу (ЗТВ), для якого проводимуться розрахунки (**Maximum Temperature**), швидкість нагрівання (**Heating rate**) та швидкість охолодження (**Cooling rate**) металу ЗТВ. При цьому надається можливість задати до 6 різних швидкостей охолодження для проведення паралельних обчислень.

Кількість термічних циклів з різними швидкостями охолодження задається через опцію **Number of cooling rates**, після чого на панелі з'являються віконця для введення числових значень швидкостей охолодження (рис. 12).

По замовчуванню температура вводиться в °C, а швидкості нагрівання та охолодження в °C/сек. Зміна одиниць вимірювання, за необхідності, здійснюється через команду **Options** у головному меню програми.

Температура повної аустенітизації (**Austenitisation temperature**) сталі заданого хімічного складу обчислюється автоматично та висвічується на панелі введення вихідних даних.

По завершенню введення вихідних даних, розрахунок запускається командою **Start calculation**. Результати розрахунку виводяться на екран у графічному вигляді, як показано на рис. 13.

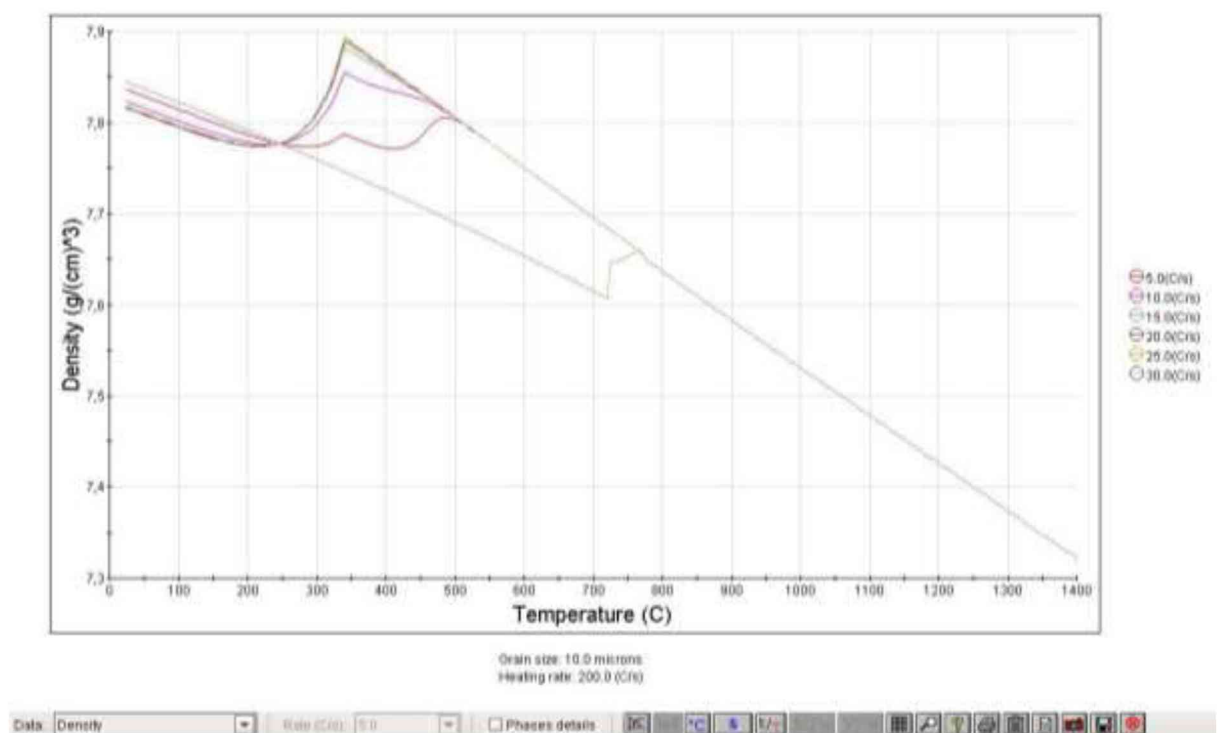


Рис. 13. Варіант розрахованих в JMatPro залежностей густини металу 3ТВ від температури для заданих термічних циклів

Для заданих користувачем термічних циклів, програмою автоматично виконується розрахунок температурних залежностей низки фізичних та механічних властивостей досліджуваної сталі. Виклик результатів обчислень здійснюється через команду **Data** у нижньому контекстному меню (рис. 14).

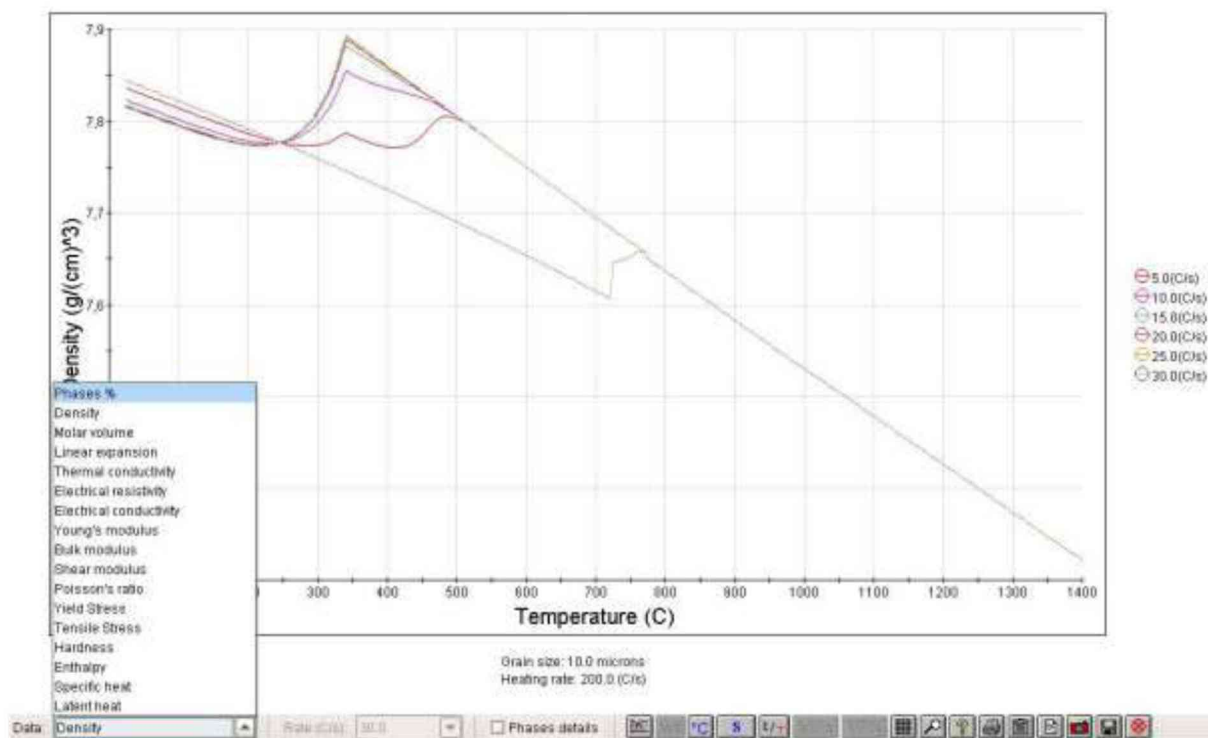


Рис. 14. Меню вибору результатів розрахунків структурних діаграм та механічних властивостей металу ЗТВ

При виборі команди Phases % у спливаючому меню викликаються результати розрахунку структурних діаграм ЗТВ (рис. 15).

По замовчуванню зміни об'ємної частки фазових складових структури ЗТВ представляються в залежності від температури (рис. 15). За бажанням, для більш наочного представлення кінцевого фазового складу металу ЗТВ, можна поміняти аргумент осі абсцис з температури на час, шляхом натискання віртуальної кнопки t/T в нижньому контекстному меню (рис. 16).

Також, за бажанням, через нижнє контекстне меню можна поміняти одиниці вимірювання температури, що по замовчуванню виводиться на графіках в °C та часу, який виводиться в секундах.

Термічні цикли, обчислені та побудовані програмою JMatPro для різних заданих користувачем швидкостей охолодження, виводяться послідовно через вибір значення швидкості охолодження в нижньому контекстному меню командою **Rate (C/s)**.

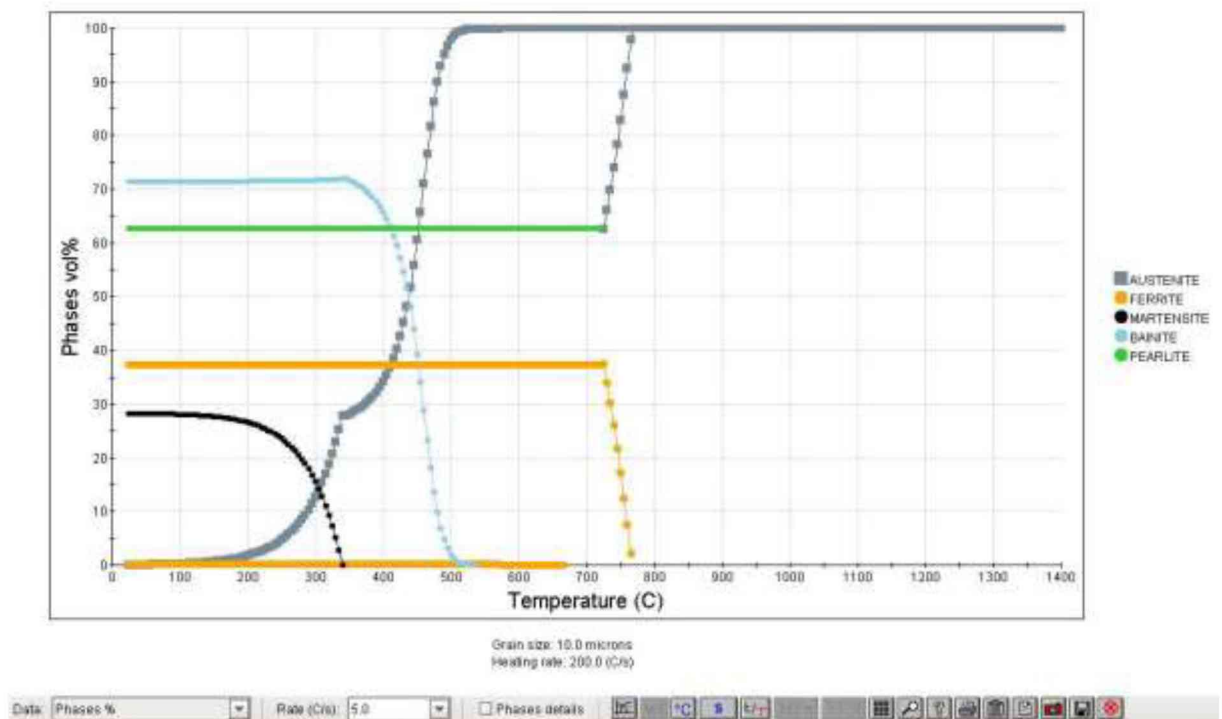


Рис. 15. Графічне представлення розрахованої програмою JMatPro структурної діаграми ЗТВ для термічного циклу зі швидкістю охолодження 5 °C/сек

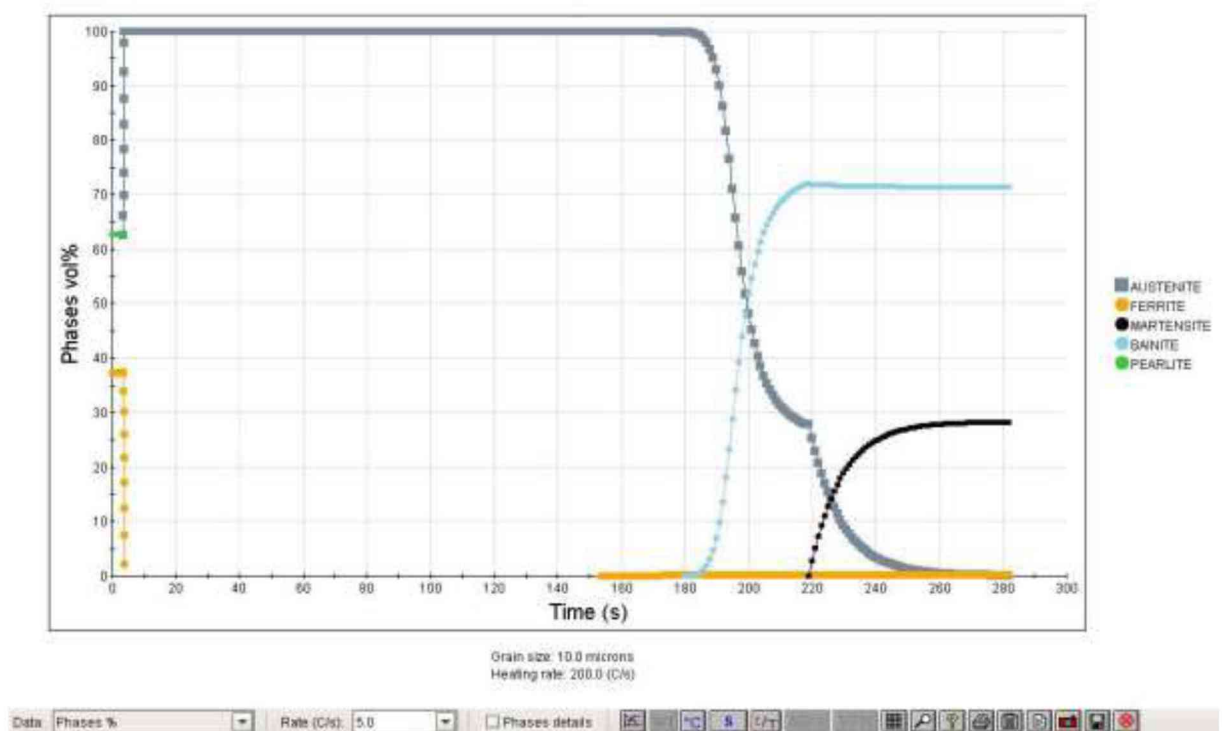


Рис. 16. Заміна в структурній діаграмі температурної залежності фазового складу металу ЗТВ на часову

На рисунках 17 та 18 наведено приклади обчислених для швидкостей охолодження 10 та 30 °C/сек структурних діаграм ЗТВ.

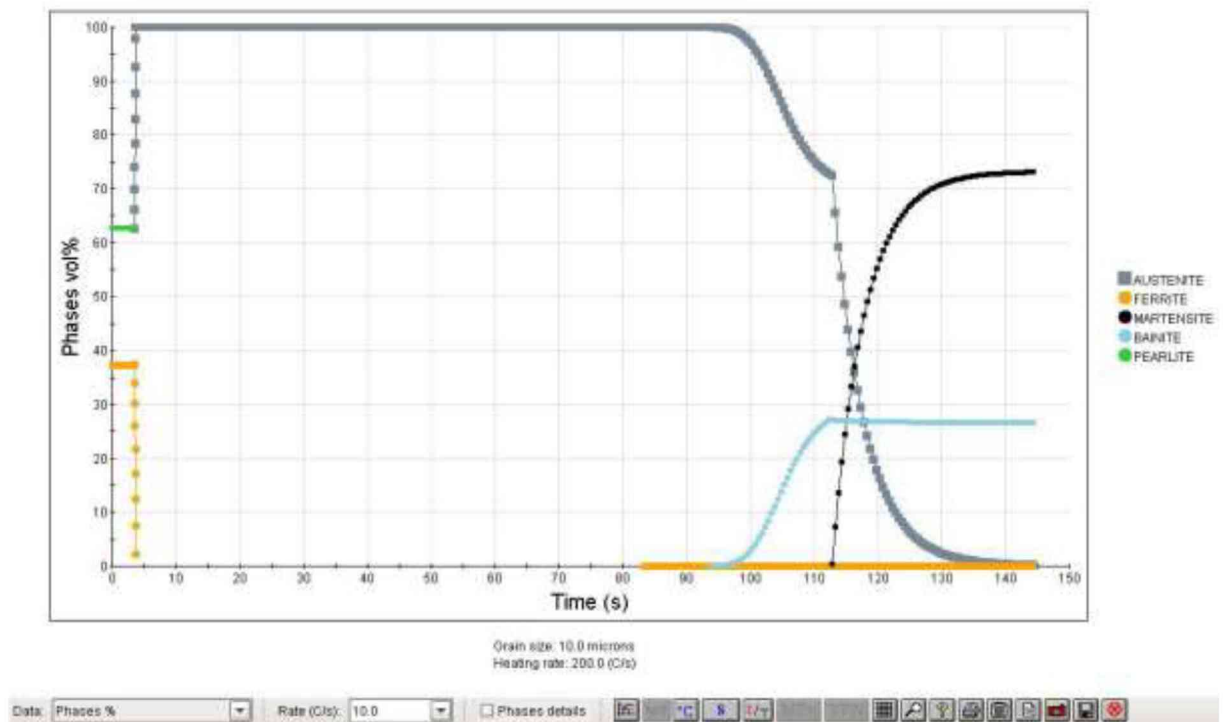


Рис. 17. Графічне представлення розрахованої програмою JMatPro структурної діаграми ЗТВ для термічного циклу зі швидкістю охолодження 10 °C/сек

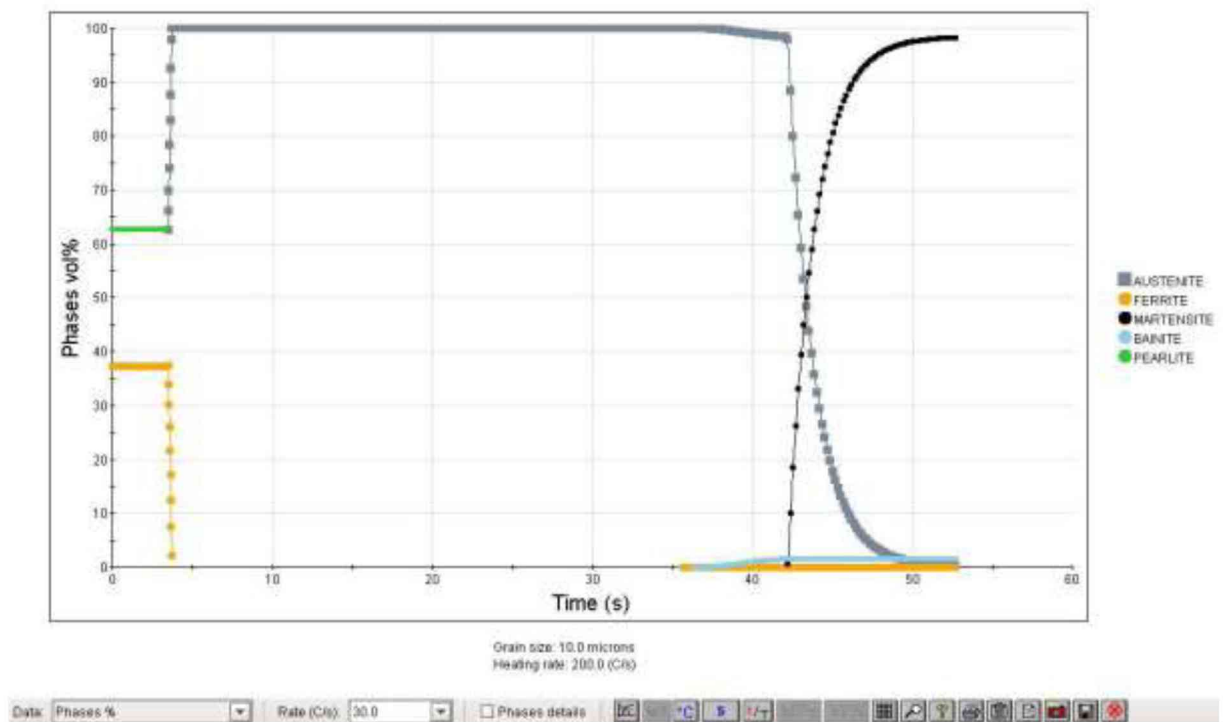


Рис. 18. Графічне представлення розрахованої програмою JMatPro структурної діаграми ЗТВ для термічного циклу зі швидкістю охолодження 30 °C/сек

Можна бачити, як поступове збільшення швидкості охолодження з 5 до 30 °C/сек обумовлює зростання вмісту мартенситної фази в металі ЗТВ досліджуваної сталі.

Через спливаюче меню **Data** (рис. 14), для заданих термічних циклів, можна також вивести на екран залежності границі плинності, границі міцності на розтяг та твердості від часу охолодження або температури металу ЗТВ шляхом послідовного вибору команд **Yield Stress**, **Tensile Stress** та **Hardness** (рис. 19-21).

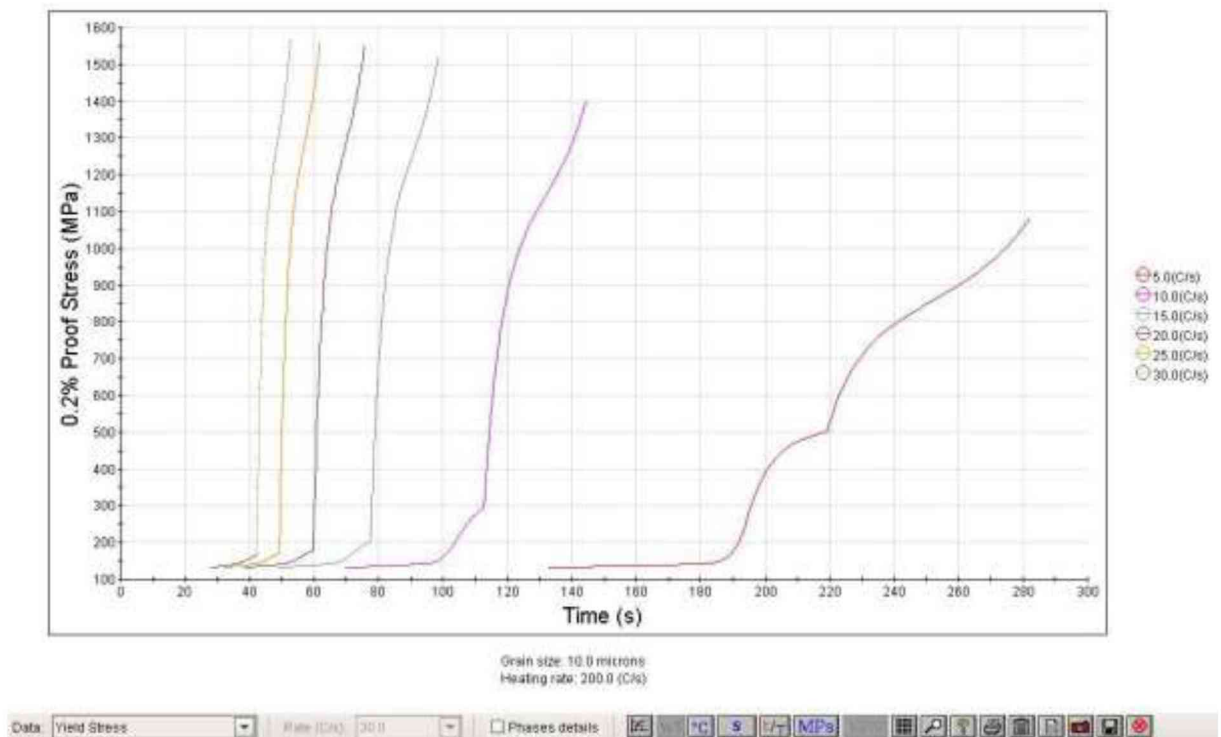


Рис. 19. Розраховані залежності границі плинності металу ЗТВ від часу охолодження для заданих термічних циклів

Аналогічно структурним діаграмам ЗТВ, для цих залежностей також можна змінювати аргумент осі абсцис з температури на час та одиниці вимірювання температури та часу. Значення границі плинності та границі міцності по замовчуванню виводяться в МПа, а твердості в HRC. Одиниці вимірювання цих властивостей можна встановлювати через відповідні віртуальні кнопки в нижньому меню програми.

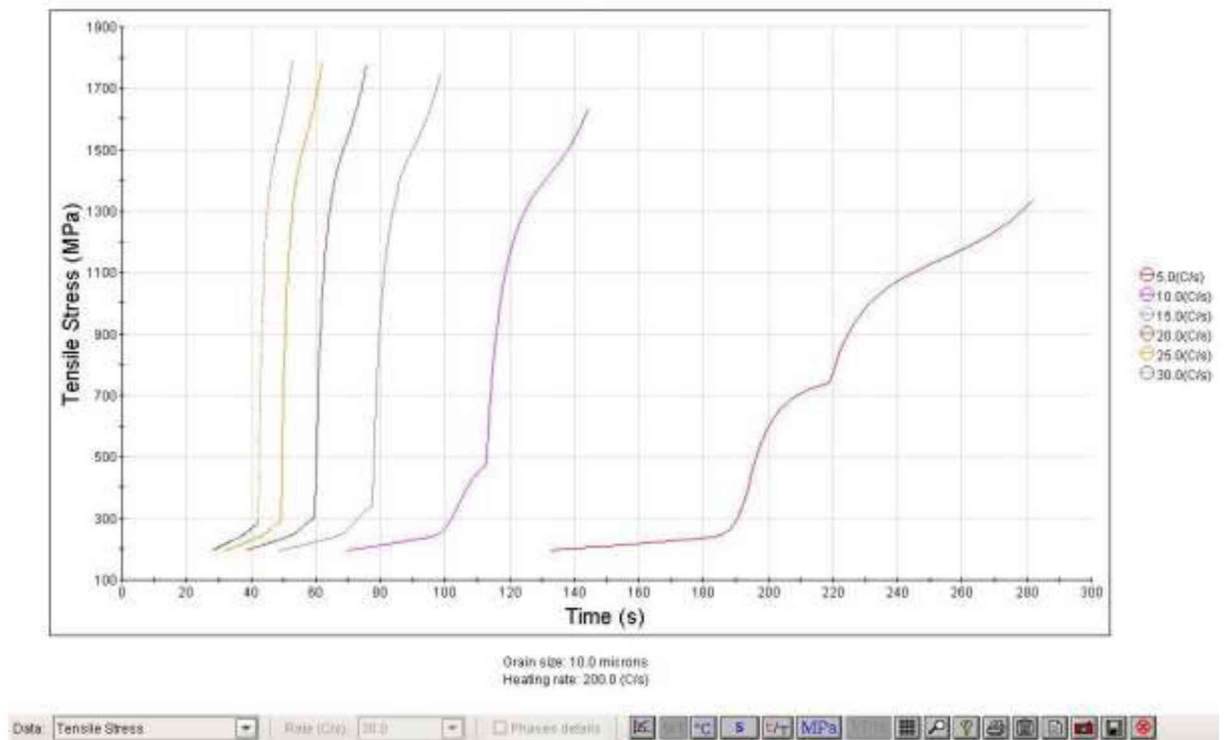


Рис. 20. Розраховані залежності границі міцності металу 3ТВ від часу охолодження для заданих термічних циклів

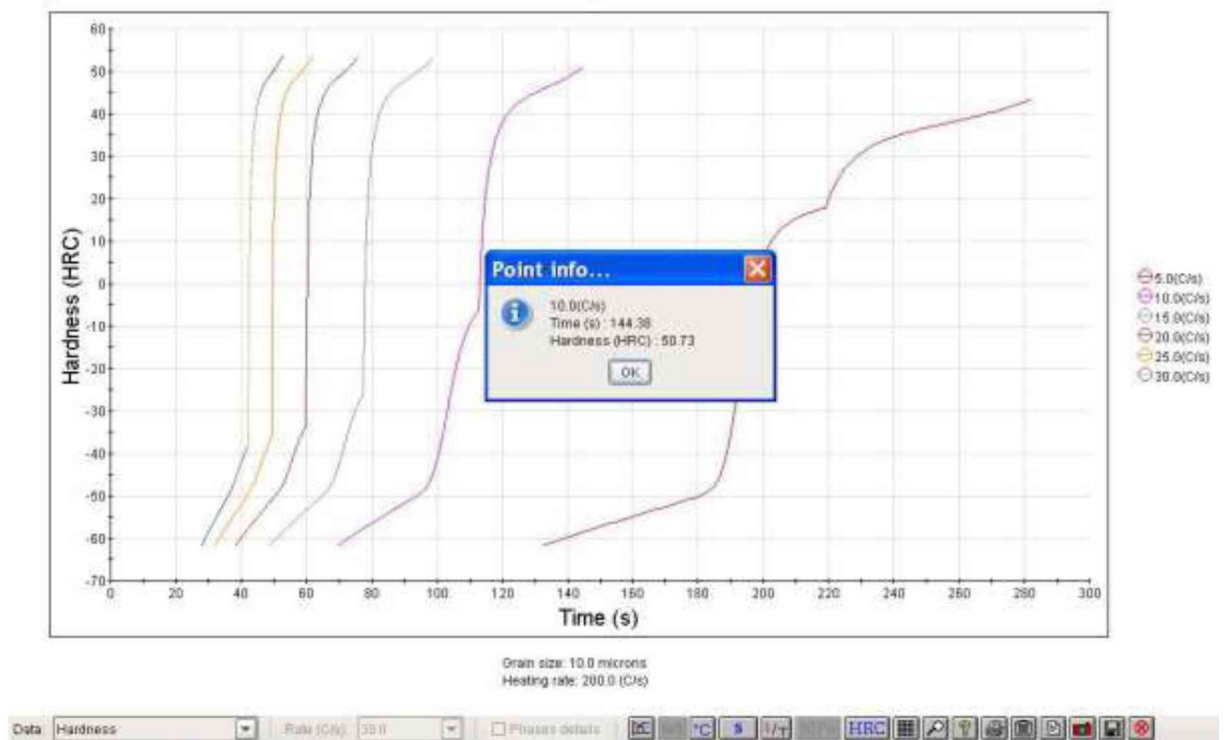


Рис. 21. Розраховані залежності твердості металу 3ТВ від часу охолодження для заданих термічних циклів

Індикація чисельного значення для будь-якої фізичної властивості досліджуваного матеріалу у довільний момент часу або за обраної температури можлива шляхом натискання лівої кнопки миші на відповідну точку графіка. При цьому на екрані спливає вікно, на якому зазначаються графік функції, що розглядається (вказується швидкість охолодження термічного циклу) та значення абсциси і ординати обраної точки (рис. 21).

Завдання для самостійної роботи

Варіант 1. Для сталі Arмох 500Т нижченаведеного хімічного складу розрахувати структурні діаграми ділянки ЗТВ, що нагрівається зі швидкістю 200 °С/с до температури 1400 °С та охолоджується зі швидкостями 5, 10, 15, 20, 25 та 30 °С/с, прийнявши середній розмір зерна: 10 мкм.

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	B
%, мас.	0.27	0.24	0.84	0.007	0.001	0.49	0.89	0.347	0.056	0.002

Для заданих умов нагрівання/охолодження визначити значення границі міцності, границі плинності та твердості металу ЗТВ після його повного остигання.

Варіант 2. Для сталі Armstal 500 нижченаведеного хімічного складу розрахувати структурні діаграми ділянки ЗТВ, що нагрівається зі швидкістю 200 °С/с до температури 1400 °С та охолоджується зі швидкостями 5, 10, 15, 20, 25 та 30 °С/с, прийнявши середній розмір зерна: 10 мкм.

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	B
%, мас.	0.32	0.22	1.16	0.01	0.002	0.85	1.09	0.24	0.03	0.11	0.0021

Для заданих умов нагрівання/охолодження визначити значення границі міцності, границі плинності та твердості металу ЗТВ після його повного остигання.

Варіант 3. Для сталі Miilux 500 нижченаведеного хімічного складу розрахувати структурні діаграми ділянки ЗТВ, що нагрівається зі швидкістю 200

°C/с до температури 1400 °C та охолоджується зі швидкостями 5, 10, 15, 20, 25 та 30 °C/с, прийнявши середній розмір зерна: 10 мкм.

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al	Ti	B
%, мас.	0.285	0.22	1.13	0.013	0.005	0.21	0.04	0.009	0.009	0.033	0.033	0.002

Для заданих умов нагрівання/охолодження визначити значення границі міцності, границі плинності та твердості металу ЗТВ після його повного остигання.

Варіант 4. Для сталі Swebor 500 нижченаведеного хімічного складу розрахувати структурні діаграми ділянки ЗТВ, що нагрівається зі швидкістю 200 °C/с до температури 1400 °C та охолоджується зі швидкостями 5, 10, 15, 20, 25 та 30 °C/с, прийнявши середній розмір зерна: 10 мкм.

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Ti	Cu	B	N
%, мас.	0.29	0.25	1.31	0.011	0.001	0.33	0.05	0.034	0.03	0.03	0.0033	0.005

Для заданих умов нагрівання/охолодження визначити значення границі міцності, границі плинності та твердості металу ЗТВ після його повного остигання.

Варіант 5. Для сталі Agtmoх 440Т нижченаведеного хімічного складу розрахувати структурні діаграми ділянки ЗТВ, що нагрівається зі швидкістю 200 °C/с до температури 1400 °C та охолоджується зі швидкостями 5, 10, 15, 20, 25 та 30 °C/с, прийнявши середній розмір зерна: 10 мкм.

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	B
%, мас.	0.19	0.22	0.85	0.008	0.001	0.6	1.91	0.586	0.036	0.002

Для заданих умов нагрівання/охолодження визначити значення границі міцності, границі плинності та твердості металу ЗТВ після його повного остигання.

Варіант 6. Для сталі Weldox 1300 нижченаведеного хімічного складу розрахувати структурні діаграми ділянки ЗТВ, що нагрівається зі швидкістю 200

°C/с до температури 1400 °C та охолоджується зі швидкостями 5, 10, 15, 20, 25 та 30 °C/с, прийнявши середній розмір зерна: 10 мкм.

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Cu	Nb
%, мас.	0.24	0.204	0.92	0.009	0.005	0.48	1.27	0.35	0.02	0.004	0.02	0.021

Для заданих умов нагрівання/охолодження визначити значення границі міцності, границі плинності та твердості металу ЗТВ після його повного остигання.

Варіант 7. Для сталі AISI 4340 нижченаведеного хімічного складу розрахувати структурні діаграми ділянки ЗТВ, що нагрівається зі швидкістю 200 °C/с до температури 1400 °C та охолоджується зі швидкостями 5, 10, 15, 20, 25 та 30 °C/с, прийнявши середній розмір зерна: 10 мкм.

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
%, мас.	0.39	0.24	0.61	0.021	0.006	0.67	1.46	0.17

Для заданих умов нагрівання/охолодження визначити значення границі міцності, границі плинності та твердості металу ЗТВ після його повного остигання.

Варіант 8. Для сталі Weldom 1100 нижченаведеного хімічного складу розрахувати структурні діаграми ділянки ЗТВ, що нагрівається зі швидкістю 200 °C/с до температури 1400 °C та охолоджується зі швидкостями 5, 10, 15, 20, 25 та 30 °C/с, прийнявши середній розмір зерна: 10 мкм.

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Nb	B
%, мас.	0.17	0.24	0.84	0.012	0.003	0.56	2.0	0.6	0.028	0.02	0.021	0.002

Для заданих умов нагрівання/охолодження визначити значення границі міцності, границі плинності та твердості металу ЗТВ після його повного остигання.

Варіант 9. Для сталі Hardox 450 нижченаведеного хімічного складу розрахувати структурні діаграми ділянки ЗТВ, що нагрівається зі швидкістю 200

°C/с до температури 1400 °C та охолоджується зі швидкостями 5, 10, 15, 20, 25 та 30 °C/с, прийнявши середній розмір зерна: 10 мкм.

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
%, мас.	0.19	0.52	1.4	0.007	0.001	0.26	0.04	0.011	0.002

Для заданих умов нагрівання/охолодження визначити значення границі міцності, границі плинності та твердості металу ЗТВ після його повного остигання.

Варіант 10. Для сталі A596 нижченаведеного хімічного складу розрахувати структурні діаграми ділянки ЗТВ, що нагрівається зі швидкістю 200 °C/с до температури 1400 °C та охолоджується зі швидкостями 5, 10, 15, 20, 25 та 30 °C/с, прийнявши середній розмір зерна: 10 мкм.

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Cu	Al	B
%, мас.	0.29	0.35	1.72	0.015	0.004	0.5	0.5	0.63	0.028	0.35	0.026	0.002

Для заданих умов нагрівання/охолодження визначити значення границі міцності, границі плинності та твердості металу ЗТВ після його повного остигання.

Варіант 11. Для сталі MIL-A-46100C нижченаведеного хімічного складу розрахувати структурні діаграми ділянки ЗТВ, що нагрівається зі швидкістю 200 °C/с до температури 1400 °C та охолоджується зі швидкостями 5, 10, 15, 20, 25 та 30 °C/с, прийнявши середній розмір зерна: 10 мкм.

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al
%, мас.	0.31	0.43	0.87	0.01	0.002	0.54	1.16	0.55	0.036

Для заданих умов нагрівання/охолодження визначити значення границі міцності, границі плинності та твердості металу ЗТВ після його повного остигання.

Варіант 12. Для сталі Hardox 500 нижченаведеного хімічного складу розрахувати структурні діаграми ділянки ЗТВ, що нагрівається зі швидкістю 200

°C/с до температури 1400 °C та охолоджується зі швидкостями 5, 10, 15, 20, 25 та 30 °C/с, прийнявши середній розмір зерна: 10 мкм.

Елемент	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	B
%, мас.	0.26	0.75	0.2	0.005	0.005	0.7	0.01	0.05	0.005	0.001

Для заданих умов нагрівання/охолодження визначити значення границі міцності, границі плинності та твердості металу ЗТВ після його повного остигання.

5. Розрахунок та побудова діаграм деформування для металу ЗТВ

План проведення практичного заняття

1. Ознайомитись з теоретичними відомостями.
2. Розглянути алгоритм вирішення типового завдання.
3. Відповідно до свого варіанту самостійно розв'язати завдання, з урахуванням заданих хімічного складу досліджуваної сталі, вихідного розміру зерна, параметрів термічного циклу зварювання та швидкостей деформації.
4. Визначити приблизне значення границі міцності для заданих швидкостей деформації.
5. Оформити та здати роботу.

Теоретичні відомості

Діаграма деформування графічно відображає залежність між напруженням і деформацією матеріалу. Крива діаграми може мати різну форму в залежності від властивостей матеріалу, його стану та умов механічного навантаження (наприклад від температури). На базі діаграми деформування металевих матеріалів можуть бути визначені такі механічні характеристики, як границя пропорційності, границя плинності, границя пружності та границя міцності.

Діаграми деформування, отримані в результаті стандартних механічних випробувань зразків зварних з'єднань дозволяють визначити лише деякі інтегральні показники міцності та пластичності металу досліджуваних з'єднань загалом. Натомість, за допомогою розрахункових алгоритмів JMatPro надається можливість оцінки прогнозованих механічних властивостей окремих областей ЗТВ зварного з'єднання, залежно від хімічного складу досліджуваної сталі, вихідного розміру зерна, параметрів термічного циклу зварювання та зовнішніх умов (швидкості деформації і температури).

Алгоритм виконання роботи

У головному меню програми JMatPro (рис. 8) обираємо з групи команд **Mechanical Properties** команду **Flow Stress Analysis**, що відкриває панель для введення вихідних даних до розрахунку (рис. 22).

The screenshot shows the JMatPro software window titled "JMatPro the materials property simulation software." The menu bar includes "File", "Material Types", "Options", "Utilities", and "Help". Below the menu bar, there are buttons for "Wt %", "°C", and "Show properties".

The main panel is titled "General Steel" and "Flow Stress Analysis". It features a section for "Room temperature strength" with a dropdown menu set to "Hardness", a text input field containing "52", and another dropdown menu set to "HRC". Below these are two buttons: "Run calculation" and "Help".

On the left side, there is a table showing the chemical composition (Wt %) of the steel:

Element	Wt %
Fe	96.185
Al	0.03
Cr	0.85
Cu	0.11
Co	0.0
Mn	0.94
Mo	0.24
Nb	0.0
Ni	1.1
O	0.0
Si	0.23
Ta	0.0
Ti	0.0
V	0.0
W	0.0
B	0.0024
C	0.3
N	0.0
P	0.01
S	0.0030

At the bottom left, there are buttons for "Tutor" and "Reset". The status bar at the bottom indicates "waiting for user input..."

Рис. 22. Панель вихідних даних для розрахунку діаграм деформування металу ЗТВ

В лівій колонці панелі (рис. 22) відображається хімічний склад сталі, для якої здійснюватиметься розрахунок. Вихідні дані для початку обчислень передбачають введення для сталі заданого складу лише одного з трьох показників механічних властивостей за кімнатної температури **Room temperature strength**. За вибором користувача це може бути границя плинності (**Yield Stress**), границя міцності на розтяг (**Tensile Stress**) або твердість (**Hardness**) у

відповідних одиниць вимірювання запропонованих програмою. Запуск розрахунку здійснюється командою **Run calculation**.

По завершенні обчислень результати виводяться на екран у вигляді графічних залежностей напруження/деформація. По замовченню графіки відображаються програмою для швидкості деформації $0,001 \text{ c}^{-1}$, при різних температурах (рис. 23).

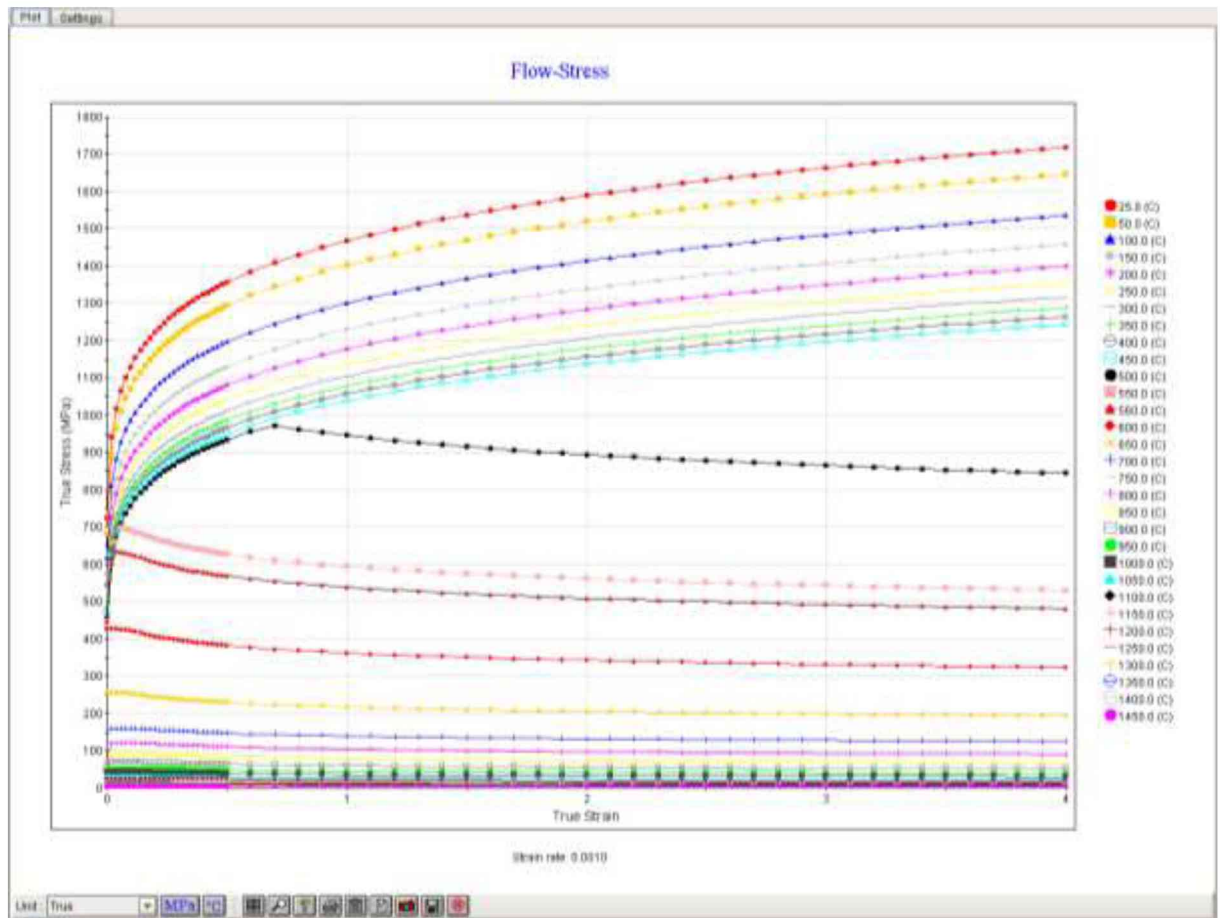


Рис. 23. Представлення результатів розрахунку діаграм деформування у програмі JMatPro

Редагування формату діаграм деформування здійснюється через меню **Settings** у верхній частині вікна (рис. 24). Для цього замість команди **Fix strain rate**, що обумовлює вивід графіків для фіксованої (незмінної) швидкості деформації, необхідно переключити формат виводу графіків в режим постійної температури **Fix temperature (C)**.

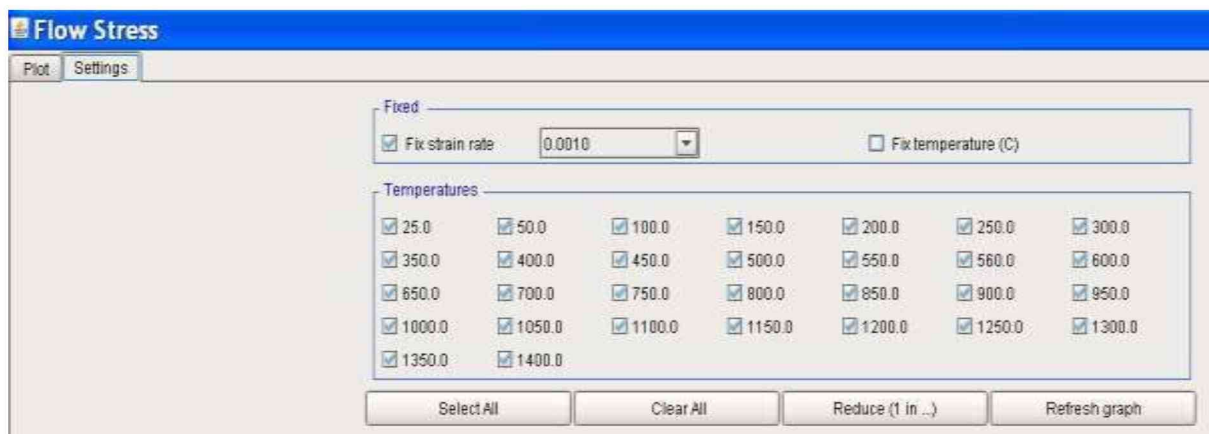


Рис. 24. Меню редагування формату діаграм деформування. Налаштування виводу графіків для фіксованої швидкості деформації та різної температури

Після заміни формату виводу графіків, з'явиться меню налаштування виводу графіків для фіксованої температури та різної швидкості деформації (рис. 25), в якому можна задати значення температури та швидкостей деформації. Наприклад, 25 °C та 0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100 та 1000 с^{-1} , відповідно. Внесені зміни підтверджуються командою **Refresh graph**.

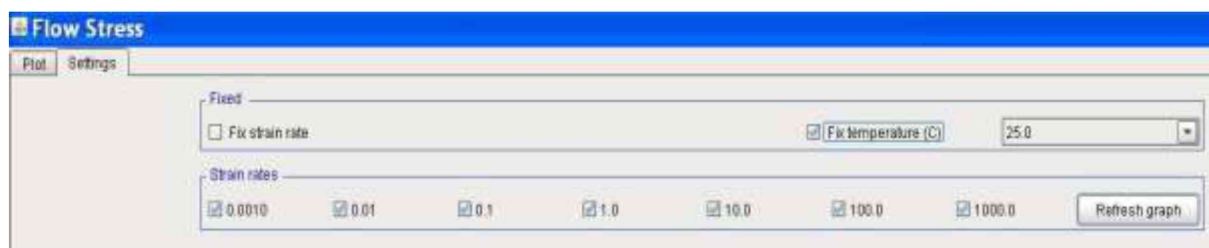


Рис. 25. Меню редагування формату діаграм деформування. Налаштування виводу графіків для фіксованої температури та різної швидкості деформації

В результаті налаштування формату виводу діаграм деформування графічні залежності напруження/деформація змінять свій вигляд (рис. 26).

По замовченню програма виводить на екран діаграми істинних напружень-деформацій. За необхідності їх можна перебудувати в діаграми умовних напружень деформацій командою **Unit** в лівій нижній частині вікна (рис. 26, 27).

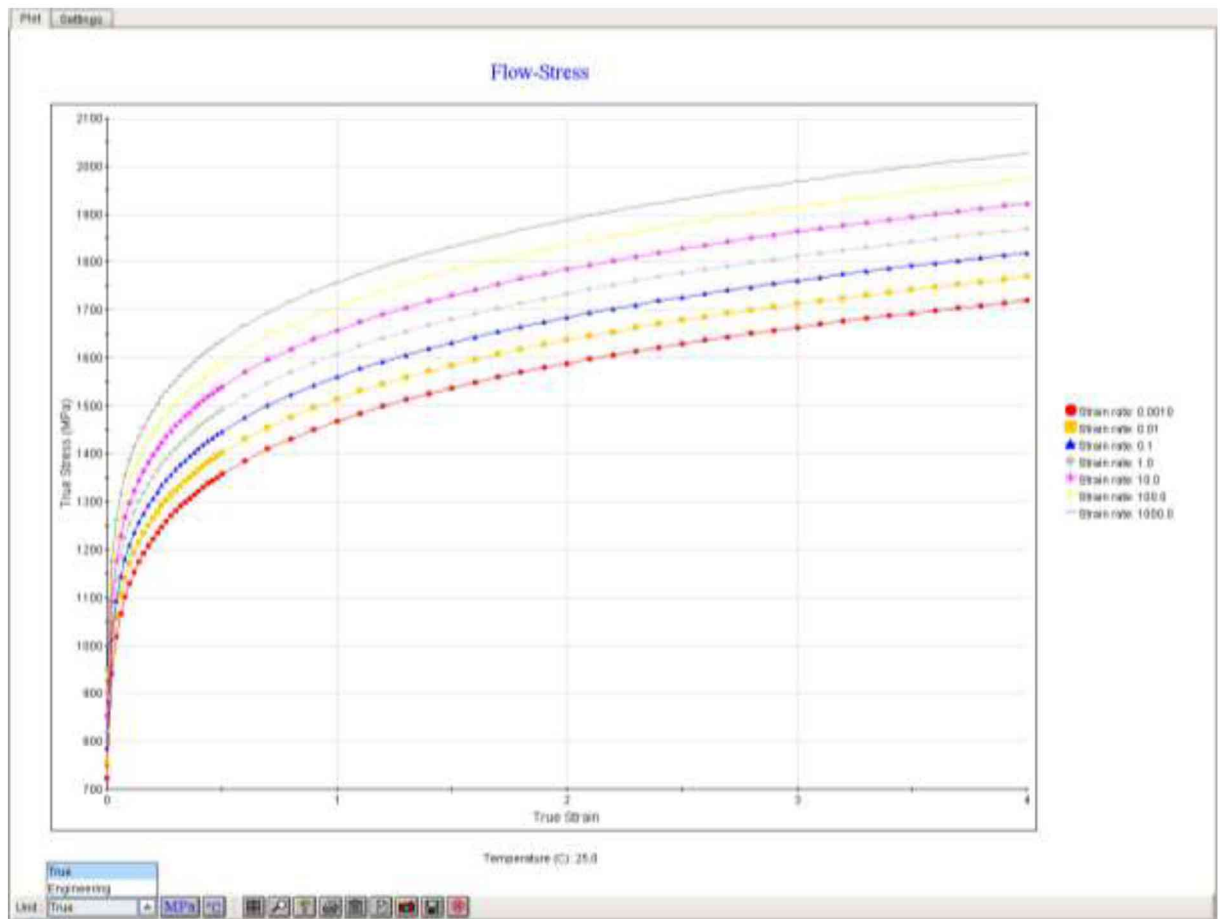


Рис. 26. Діаграми деформування, перебудовані для умов постійної температури та різної швидкості деформації

Режим відтворення діаграм істинних напружень-деформацій вмикається командою **True**, а умовних напружень-деформацій – командою **Engineering**.

Приклад вирішення типового завдання

Нехай для будь-якого з раніше виконаних варіантів розрахунку (див. розд. 4) необхідно побудувати діаграму деформування металу ЗТВ, що охолоджувався з найбільшою та найменшою швидкостями (5 та 30 °C/с), при кімнатній температурі $T = 25\text{ °C}$, для різних швидкостей деформації: 0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000 с^{-1} .

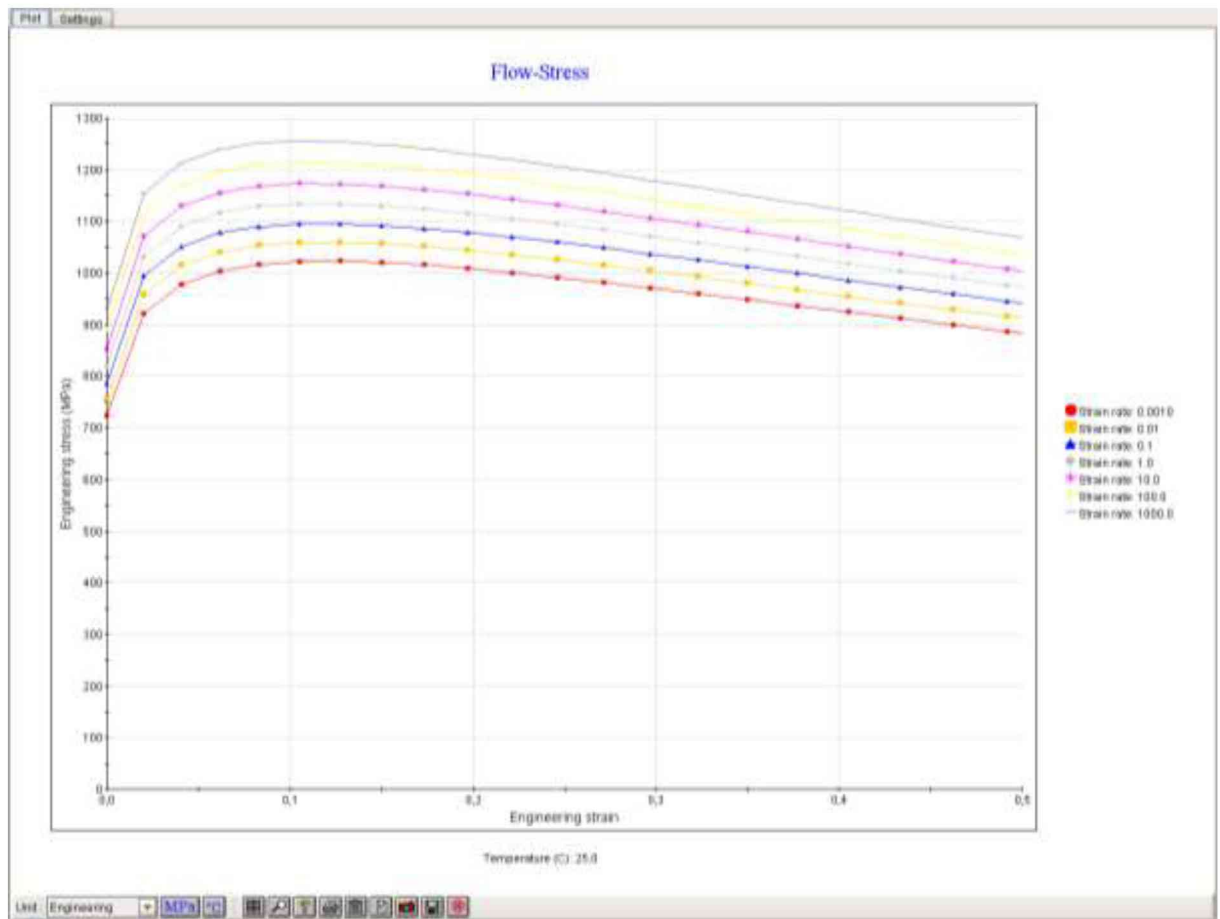


Рис. 27. Діаграми умовних напружень-деформацій

Для цього на отриманій залежності твердості металу ЗТВ від часу охолодження (див. рис. 21) на графіках, що відповідають швидкості охолодження 5 та 30 °C/с знаходимо крайні точки, такі, що відповідають максимальному для кожного графіку значенні часу. Шляхом натискання лівої кнопки миші на відповідну точку графіка отримаємо чисельне значення кінцевої твердості після повного охолодження до кімнатної температури. Після цього, послідовно для обох знайдених чисельних значень твердості металу ЗТВ виконуємо розрахунок згідно розглянутого вище алгоритму (рис. 8, 22-27). Спочатку в меню вихідних даних для розрахунку діаграм деформування (рис. 22) вводимо значення твердості металу ЗТВ при швидкості охолодження 5 °C/с і запускаємо розрахунок. Отримавши його результати, зберігаємо дані та повторюємо розрахунок для твердості металу ЗТВ при швидкості охолодження 30 °C/с.

Завдання для самостійної роботи

Варіант 1. Користуючись результатами попереднього розрахунку для сталі Arмох 500Т (Завдання 2.2, стор. 39) розрахувати діаграми деформування металу ЗТВ, що охолоджувався зі швидкістю 5 та 30 °С/с, при $T = 25$ °С для швидкості деформації: 0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000 с⁻¹. На побудованих діаграмах визначити приблизне значення границі міцності для швидкості деформації: 0,001 та 1000 с⁻¹.

Варіант 2. Користуючись результатами попереднього розрахунку для сталі Armstal 500 (Завдання 2.2, стор. 39) розрахувати діаграми деформування металу ЗТВ, що охолоджувався зі швидкістю 5 та 30 °С/с, при $T = 25$ °С для швидкості деформації: 0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000 с⁻¹. На побудованих діаграмах визначити приблизне значення границі міцності для швидкості деформації: 0,001 та 1000 с⁻¹.

Варіант 3. Користуючись результатами попереднього розрахунку для сталі Міілух 500 (Завдання 2.2, стор. 39) розрахувати діаграми деформування металу ЗТВ, що охолоджувався зі швидкістю 5 та 30 °С/с, при $T = 25$ °С для швидкості деформації: 0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000 с⁻¹. На побудованих діаграмах визначити приблизне значення границі міцності для швидкості деформації: 0,001 та 1000 с⁻¹.

Варіант 4. Користуючись результатами попереднього розрахунку для сталі Swebor 500 (Завдання 2.2, стор. 40) розрахувати діаграми деформування металу ЗТВ, що охолоджувався зі швидкістю 5 та 30 °С/с, при $T = 25$ °С для швидкості деформації: 0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000 с⁻¹. На побудованих діаграмах визначити приблизне значення границі міцності для швидкості деформації: 0,001 та 1000 с⁻¹.

Варіант 5. Користуючись результатами попереднього розрахунку для сталі Arмох 440Т (Завдання 2.2, стор. 40) розрахувати діаграми деформування металу ЗТВ, що охолоджувався зі швидкістю 5 та 30 °С/с, при $T = 25$ °С для

швидкості деформації: 0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000 с^{-1} . На побудованих діаграмах визначити приблизне значення границі міцності для швидкості деформації: 0,001 та 1000 с^{-1} .

Варіант 6. Користуючись результатами попереднього розрахунку для сталі Weldox 1300 (Завдання 2.2, стор. 40) розрахувати діаграми деформування металу ЗТВ, що охолоджувався зі швидкістю 5 та 30 $^{\circ}\text{C}/\text{с}$, при $T = 25^{\circ}\text{C}$ для швидкості деформації: 0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000 с^{-1} . На побудованих діаграмах визначити приблизне значення границі міцності для швидкості деформації: 0,001 та 1000 с^{-1} .

Варіант 7. Користуючись результатами попереднього розрахунку для сталі AISI 4340 (Завдання 2.2, стор. 41) розрахувати діаграми деформування металу ЗТВ, що охолоджувався зі швидкістю 5 та 30 $^{\circ}\text{C}/\text{с}$, при $T = 25^{\circ}\text{C}$ для швидкості деформації: 0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000 с^{-1} . На побудованих діаграмах визначити приблизне значення границі міцності для швидкості деформації: 0,001 та 1000 с^{-1} .

Варіант 8. Користуючись результатами попереднього розрахунку для сталі Weldox 1100 (Завдання 2.2, стор. 41) розрахувати діаграми деформування металу ЗТВ, що охолоджувався зі швидкістю 5 та 30 $^{\circ}\text{C}/\text{с}$, при $T = 25^{\circ}\text{C}$ для швидкості деформації: 0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000 с^{-1} . На побудованих діаграмах визначити приблизне значення границі міцності для швидкості деформації: 0,001 та 1000 с^{-1} .

Варіант 9. Користуючись результатами попереднього розрахунку для сталі Hardox 450 (Завдання 2.2, стор. 41) розрахувати діаграми деформування металу ЗТВ, що охолоджувався зі швидкістю 5 та 30 $^{\circ}\text{C}/\text{с}$, при $T = 25^{\circ}\text{C}$ для швидкості деформації: 0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000 с^{-1} . На побудованих діаграмах визначити приблизне значення границі міцності для швидкості деформації: 0,001 та 1000 с^{-1} .

Варіант 10. Користуючись результатами попереднього розрахунку для сталі A596 (Завдання 2.2, стор. 42) розрахувати діаграми деформування металу ЗТВ, що охолоджувався зі швидкістю 5 та 30 °C/с, при $T = 25$ °C для швидкості деформації: 0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000 с⁻¹. На побудованих діаграмах визначити приблизне значення границі міцності для швидкості деформації: 0,001 та 1000 с⁻¹.

Варіант 11. Користуючись результатами попереднього розрахунку для сталі MIL-A-46100C (Завдання 2.2, стор. 42) розрахувати діаграми деформування металу ЗТВ, що охолоджувався зі швидкістю 5 та 30 °C/с, при $T = 25$ °C для швидкості деформації: 0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000 с⁻¹. На побудованих діаграмах визначити приблизне значення границі міцності для швидкості деформації: 0,001 та 1000 с⁻¹.

Варіант 12. Користуючись результатами попереднього розрахунку для сталі Hardox 500 (Завдання 2.2, стор. 42) розрахувати діаграми деформування металу ЗТВ, що охолоджувався зі швидкістю 5 та 30 °C/с, при $T = 25$ °C для швидкості деформації: 0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1000 с⁻¹. На побудованих діаграмах визначити приблизне значення границі міцності для швидкості деформації: 0,001 та 1000 с⁻¹.

6. Оцінка зварності сталі за діаграмою Гравіля

План проведення практичного заняття

1. Ознайомитись з теоретичними відомостями.
2. Розглянути приклад вирішення типового завдання.
3. Відповідно до свого варіанту самостійно розв'язати задане завдання, для чого:
 - а) розрахувати вуглецевий еквівалент для верхньої та нижньої межі легування заданої сталі;
 - б) за результатами розрахунків позначити на полі діаграми Гравіля область, що характеризує зварність заданої сталі;
4. Проаналізувати отриманні данні та зробити висновки щодо зварності досліджуваної сталі та необхідності попереднього підігрівання під час її зварювання.
5. Оформити та здати роботу.

Теоретичні відомості

Формулу (1.1) для розрахунку вуглецевого еквіваленту CE (стор. 6) було впроваджено Міжнародним інститутом зварювання (IIW) ще у 1967 році. При цьому було запропоновано наведену в таблиці 6.1 умовну градацію вуглецевих та конструкційних низьколегованих сталей за зварністю:

Таблиця 6.1. Зварність сталей відповідно до значень вуглецевого еквіваленту CE

CE , %	Зварність
До 0,35	відмінна
0,36...0,40	хороша
0,41...0,45	задовільна
0,46...0,50	обмежена
Більше 0,50	погана

Сталі з $CE > 0,45\%$ не рекомендовано застосовувати для зварних конструкцій.

Наразі подібний підхід не може повною мірою застосовуватись для оцінки зварності сучасних мікролегованих сталей підвищеної міцності. За одного і того ж самого значення вуглецевого еквіваленту, сталі з більшим умістом вуглецю є більш чутливими до холодних тріщин, ніж мікролеговані сталі з меншим умістом вуглецю. Внаслідок цього попередня оцінка зварності легованих сталей підвищеної міцності часто виконується за діаграмою Гравіля (рис. 28).

Варто зазначити, що деякі сталі однієї і тієї ж марки, залежно від фактичного умісту врахованих формулою (1.1) елементів C, Mn, Cr, Mo, V, Cu, Ni, можуть мати різну характеристику зварності.

Приклад вирішення типового завдання

Сталь 15ХСНД належить до конструкційних низьколегованих сталей для зварних конструкцій та має наступні межі легування:

Елемент	C	Mn	Cr	V	Cu	Ni
%, мас.	0,12-0,18	0,4-0,7	0,6-0,9	0,02-0,12	0,2-0,4	0,3-0,6

Послідовно розрахуємо значення вуглецевого еквіваленту CE для наступних випадків:

- 1) уміст вуглецю та інших елементів відповідають нижній межі легування;
- 2) уміст вуглецю та інших елементів відповідають верхній межі легування;
- 3) уміст вуглецю відповідає нижній межі, а решти елементів – верхній;
- 4) уміст вуглецю відповідає верхній межі, а решти елементів – нижній.

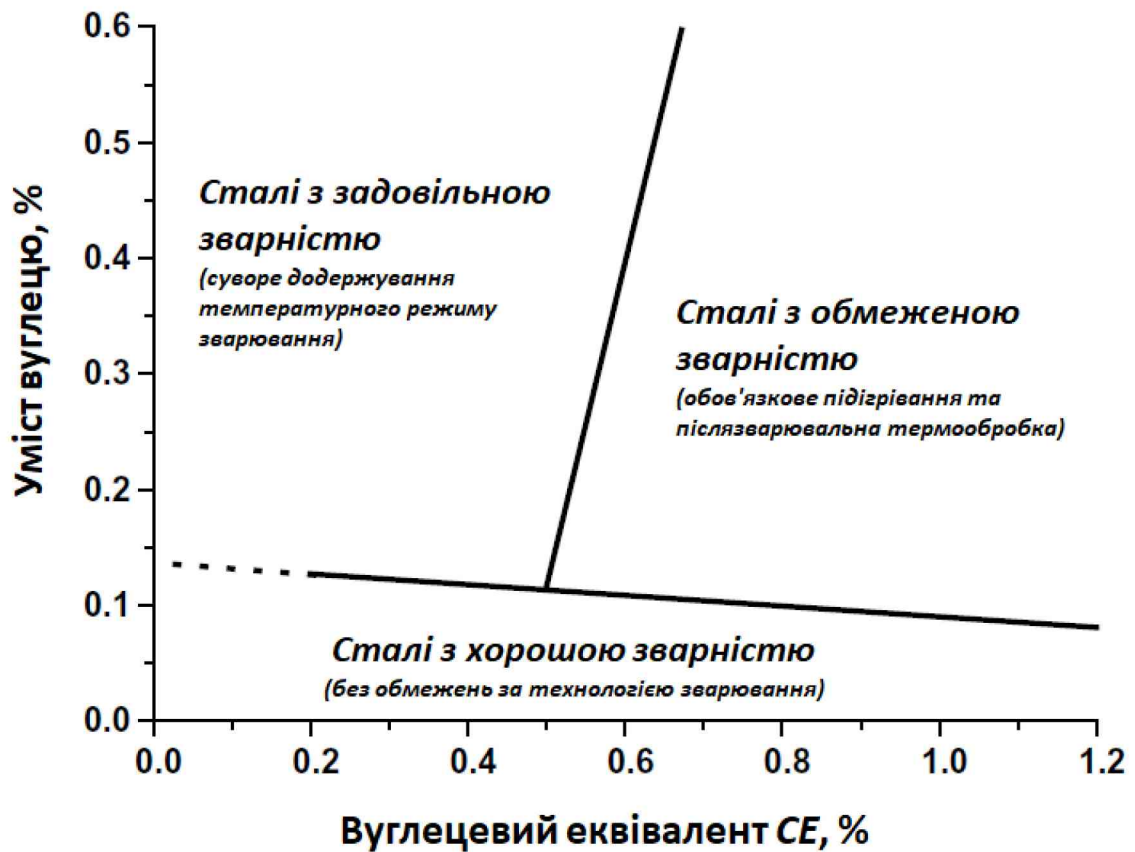


Рис. 28. Діаграма Гравіля для оцінки зварності легированих сталей високої міцності [3]

Підставивши відповідний уміст елементів у формулу (1.1)

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15},$$

отримаємо:

- 1) $CE = 0,12 + \frac{0,4}{6} + \frac{0,6 + 0,02}{5} + \frac{0,2 + 0,3}{15} = 0,344 \approx 0,34$;
- 2) $CE = 0,18 + \frac{0,7}{6} + \frac{0,9 + 0,12}{5} + \frac{0,4 + 0,6}{15} \approx 0,57$;
- 3) $CE = 0,12 + \frac{0,7}{6} + \frac{0,9 + 0,12}{5} + \frac{0,4 + 0,6}{15} \approx 0,51$;
- 4) $CE = 0,18 + \frac{0,4}{6} + \frac{0,6 + 0,02}{5} + \frac{0,2 + 0,3}{15} \approx 0,40$.

За результатами розрахунку відмітимо на полі діаграми Гравіля крайні точки області, що характеризує зварність сталі 15ХСНД (рис. 29).

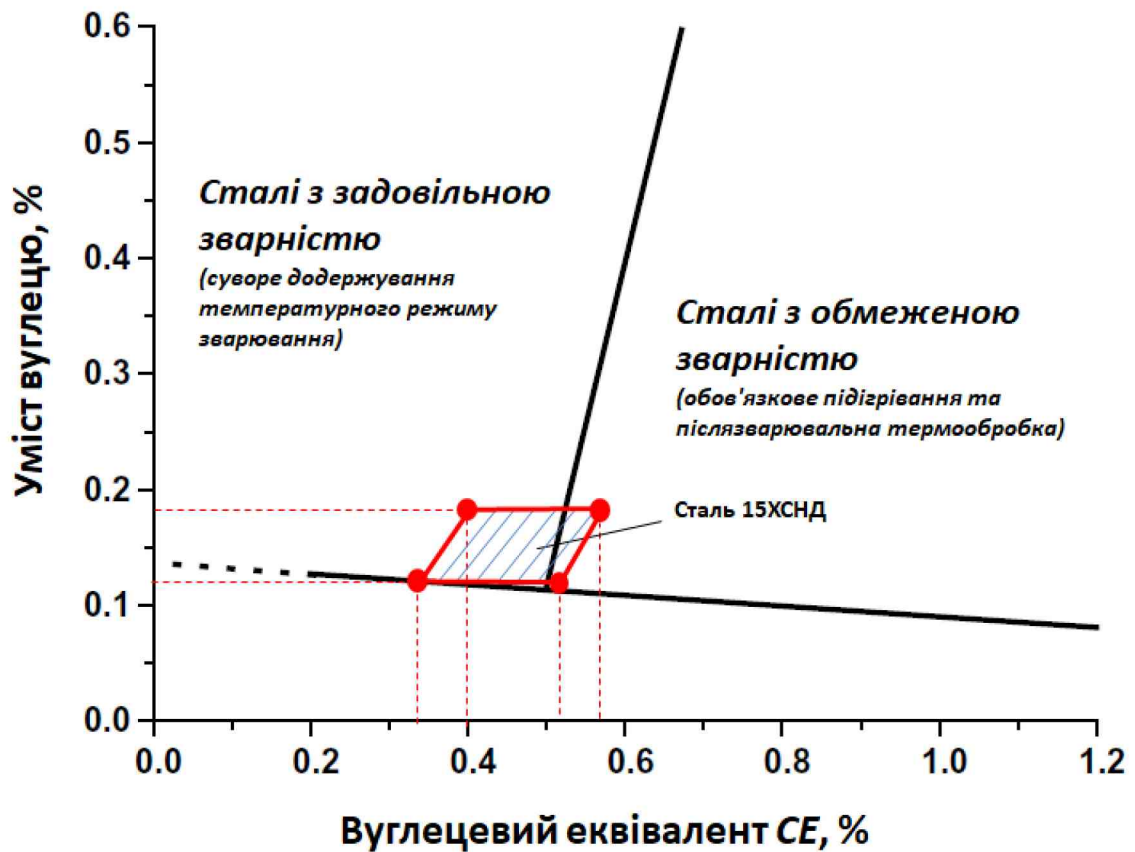


Рис. 29. Зварність сталі 15ХСНД за діаграмою Гравієля

Можна бачити, що залежно від умісту вуглецю та легувальних елементів сталь 15ХСНД може мати, як задовільну, так і обмежену зварність потребує обов'язкового попереднього підігрівання.

Завдання для самостійної роботи

Розрахуйте та покажіть на діаграмі Гравієля геометричне місце точок, що характеризує зварність заданої сталі (див. табл. 6.2). Зробіть висновки стосовно потенційної необхідності попереднього підігрівання при зварюванні даної сталі.

Таблиця 6.2. Хімічний склад сталей

Варі- ант	Сталь	Хімічний склад сталі, %						
		C	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Cu
1	15Г2СФД	0,12-0,18	1,3-1,7	-	-	0,05-0,10	-	0,15-0,30
2	12ХН2	0,09-0,16	0,3-0,6	0,6-0,9	-	-	1,5-1,9	-
3	15ХГНМ	0,13-0,18	0,7-1,1	0,4-0,7	0,15-0,25	-	0,4-0,7	-
4	20Н2М	0,17-0,25	0,4-0,7	-	0,2-0,3	-	1,5-1,9	-
5	12МХ	0,09-0,16	0,4-0,7	0,4-0,7	0,4-0,6	-	-	-
6	20ХН	0,17-0,23	0,4-0,7	0,45-0,75	-	-	1,0-1,4	-
7	20ХГНМ	0,18-0,23	0,7-1,1	0,4-0,7	0,15-0,25	-	0,4-0,7	-
8	18Г2АФД	0,14-0,22	1,3-1,7	-	-	0,08-0,15	-	0,15-0,30
9	15ХФА	0,13-0,17	0,40-0,65	0,5-0,7	-	0,04-0,09	-	-
10	23Г2Д	0,21-0,26	1,3-1,6	-	-	-	0,2-0,3	0,2-0,3
11	15ХМФА	0,13-0,17	0,45-0,65	0,5-0,7	0,10-0,15	0,04-0,09	-	-
12	13Н2ХА	0,10-0,16	0,3-0,6	0,2-0,5	-	-	1,7-2,1	-

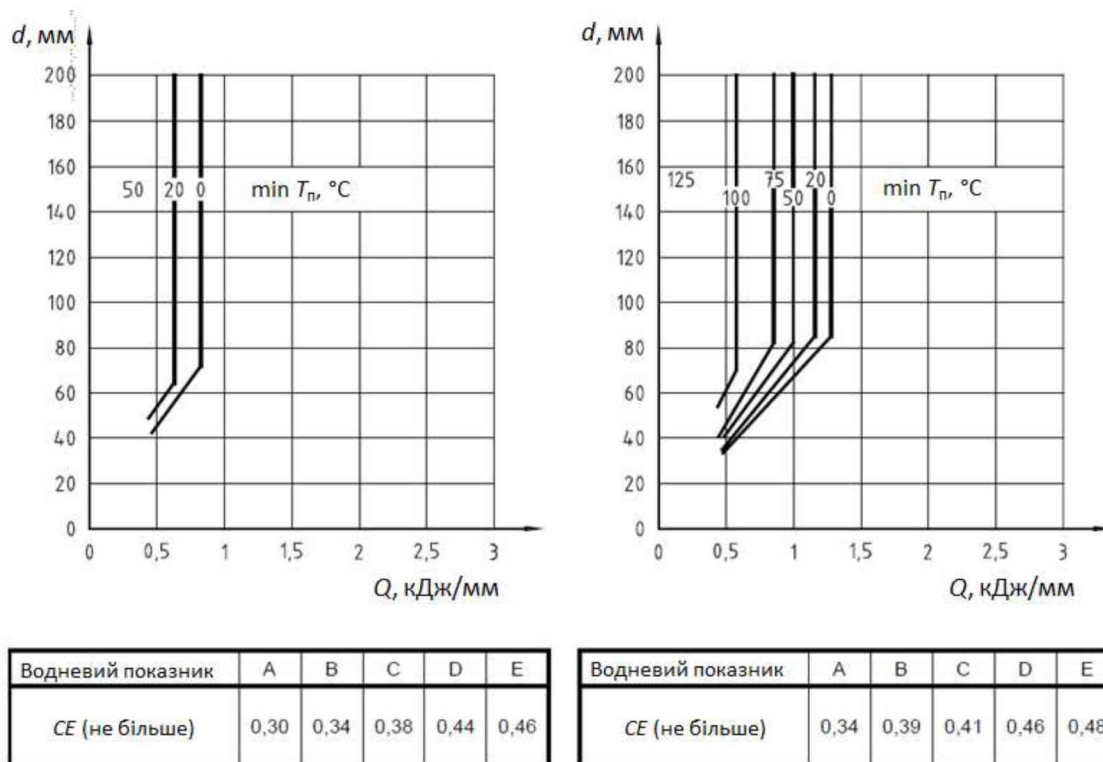
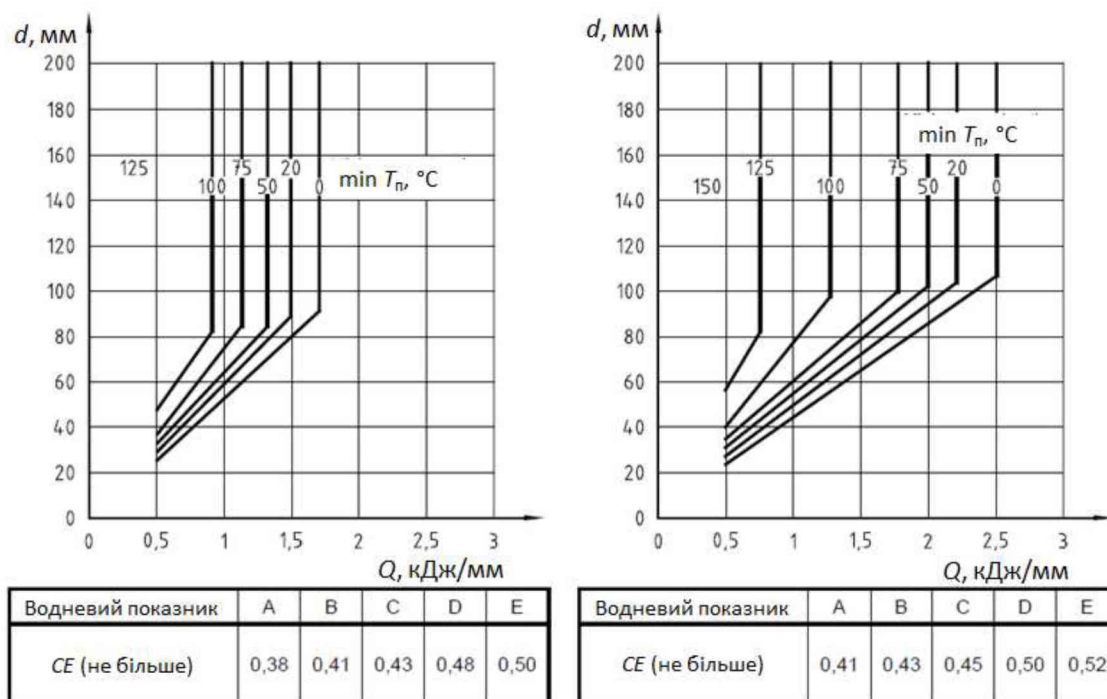
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Зварювання високоміцних сталей. Домашня контрольна робота [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка», спеціалізації «Технології та інжиніринг у зварюванні» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад. О. А. Сливінський. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 20 с.
2. Зварювання високоміцних сталей. Курсова робота [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка», спеціалізації «Технології та інжиніринг у зварюванні» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад. О. А. Сливінський. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 35 с.
3. ДСТУ ISO/TR 17671-2:2015. «Зварювання. Рекомендації щодо зварювання металевих матеріалів. Частина 2. Дугове зварювання феритних сталей». [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
http://www.leonorm.lviv.ua/portal/Default.php?Page=login&ContinueURL=/Default.php?Page=stfull!_!ObjId=21549&ispaid=1.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ ISO/TR 17671-2:2015. «Зварювання. Рекомендації щодо зварювання металевих матеріалів. Частина 2. Дугове зварювання феритних сталей». [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
http://www.leonorm.lviv.ua/portal/Default.php?Page=login&ContinueURL=/Default.php?Page=stfull!_!ObjId=21549&ispaid=1.
2. Saunders N. CALPHAD (Calculation of Phase Diagrams): A Comprehensive Guide / N. Saunders, A. P. Miodownik. – Pergamon, 1998. – 480 p.
3. Graville B. A. Cold Cracking in Welds in HSLA Steels / B. A. Graville // Welding of HSLA (Microalloyed) Steels: *AIM/ASM Conference, 9-12 November 1976 / Rome, Italy*. – p. 85-101.

Діаграми для визначення температури попереднього підігрівання

Рис. 1А. Температурний режим зварювання сталей з визначеним водневим показником та вуглецевим еквівалентом *CE*Рис. 2А. Температурний режим зварювання сталей з визначеним водневим показником та вуглецевим еквівалентом *CE*

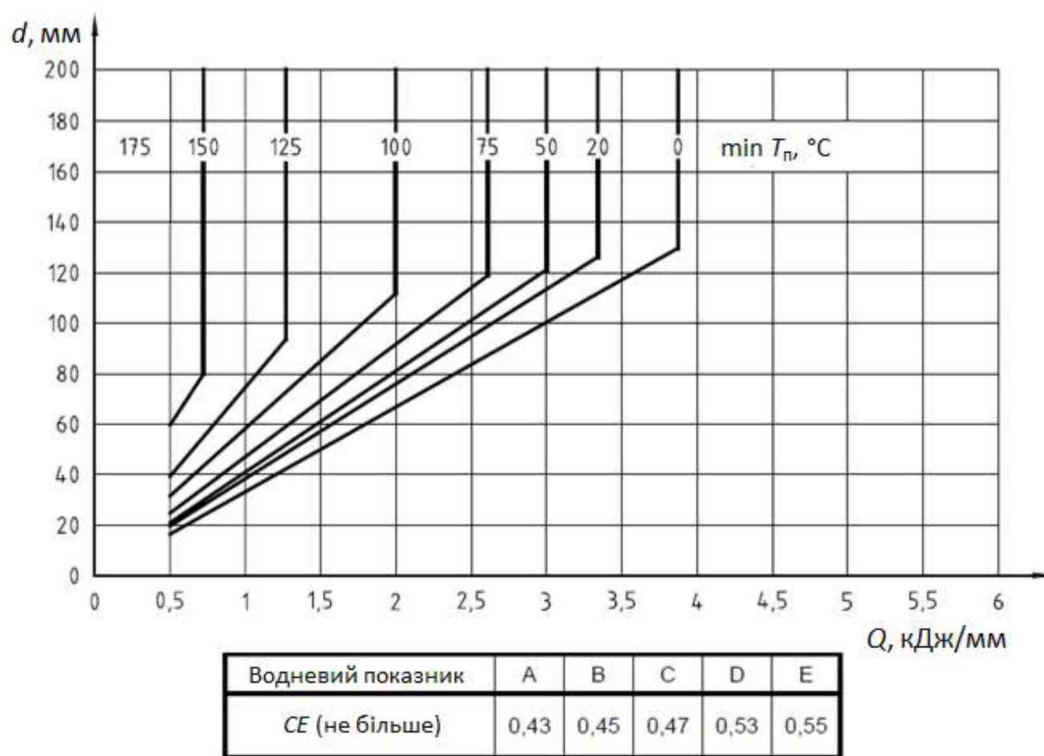


Рис. 3А. Температурний режим зварювання сталей з визначеним водневим показником та вуглецевим еквівалентом CE

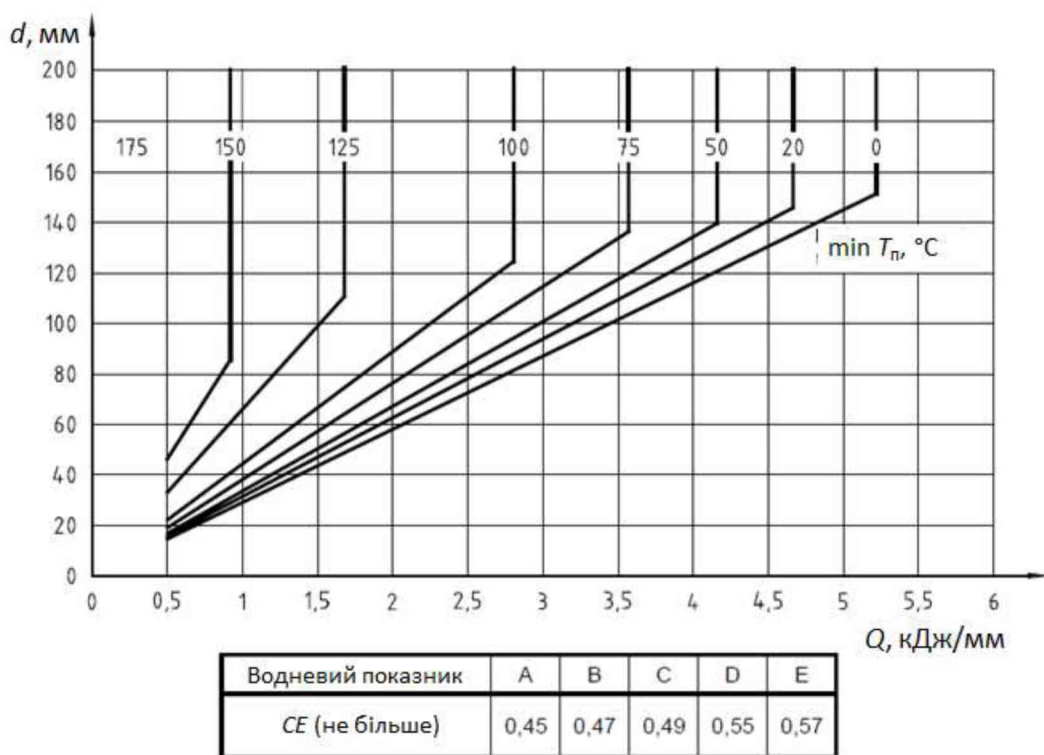


Рис. 4А. Температурний режим зварювання сталей з визначеним водневим показником та вуглецевим еквівалентом CE

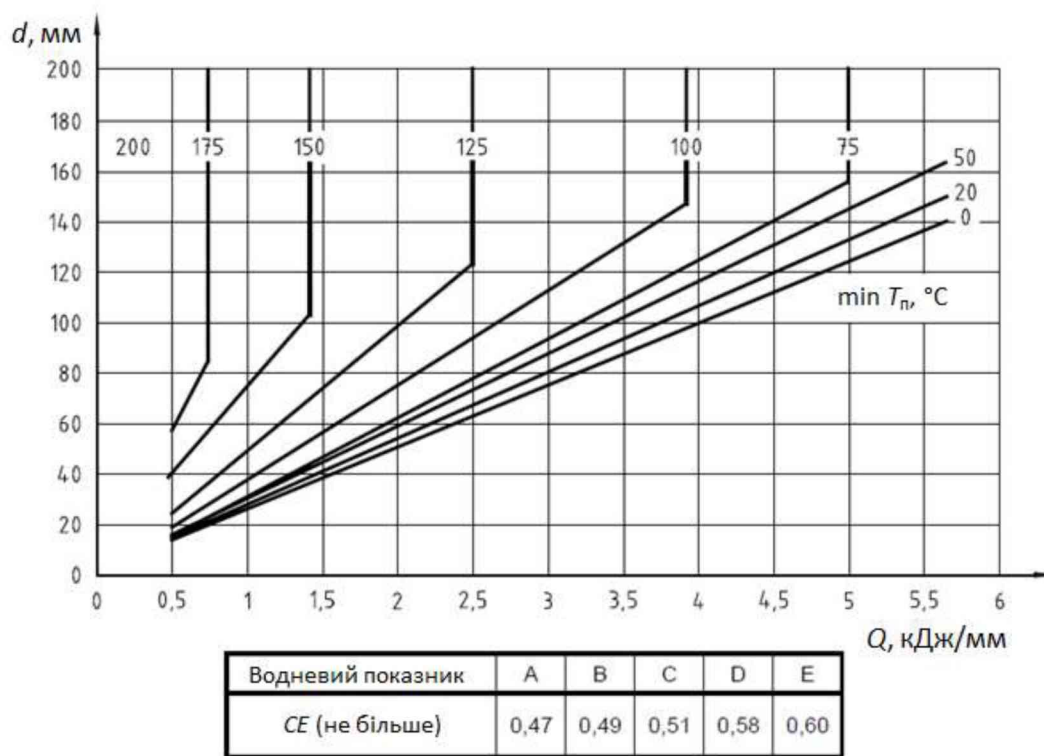


Рис. 5А. Температурний режим зварювання сталей з визначеним водневим показником та вуглецевим еквівалентом CE

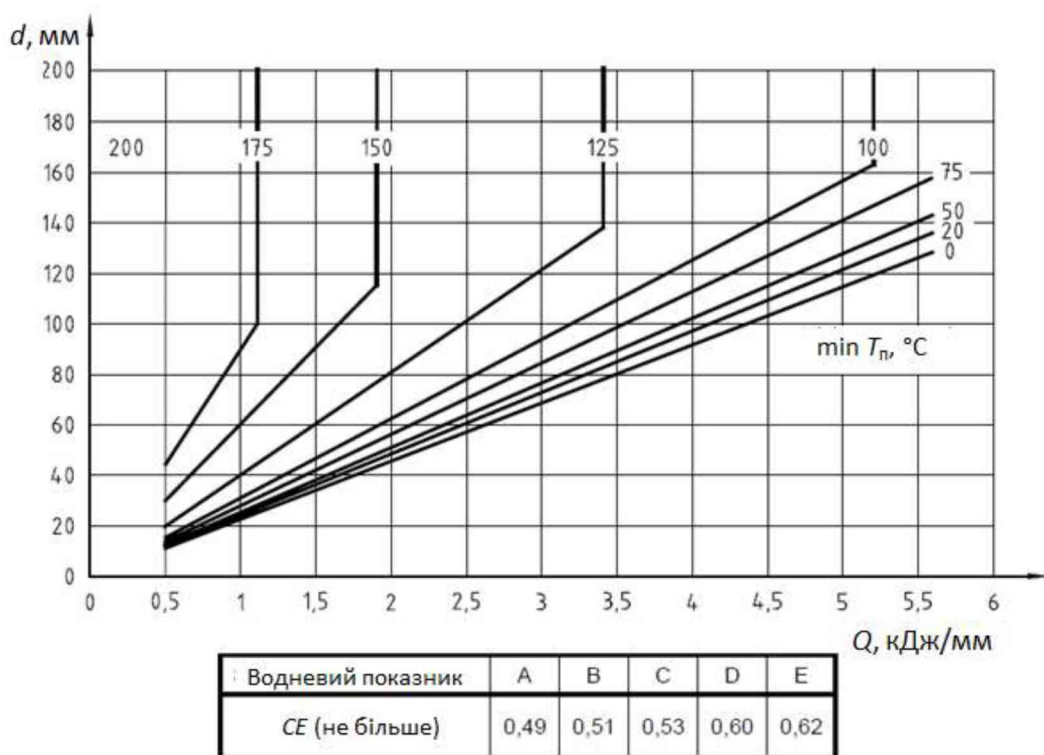


Рис. 6А. Температурний режим зварювання сталей з визначеним водневим показником та вуглецевим еквівалентом CE

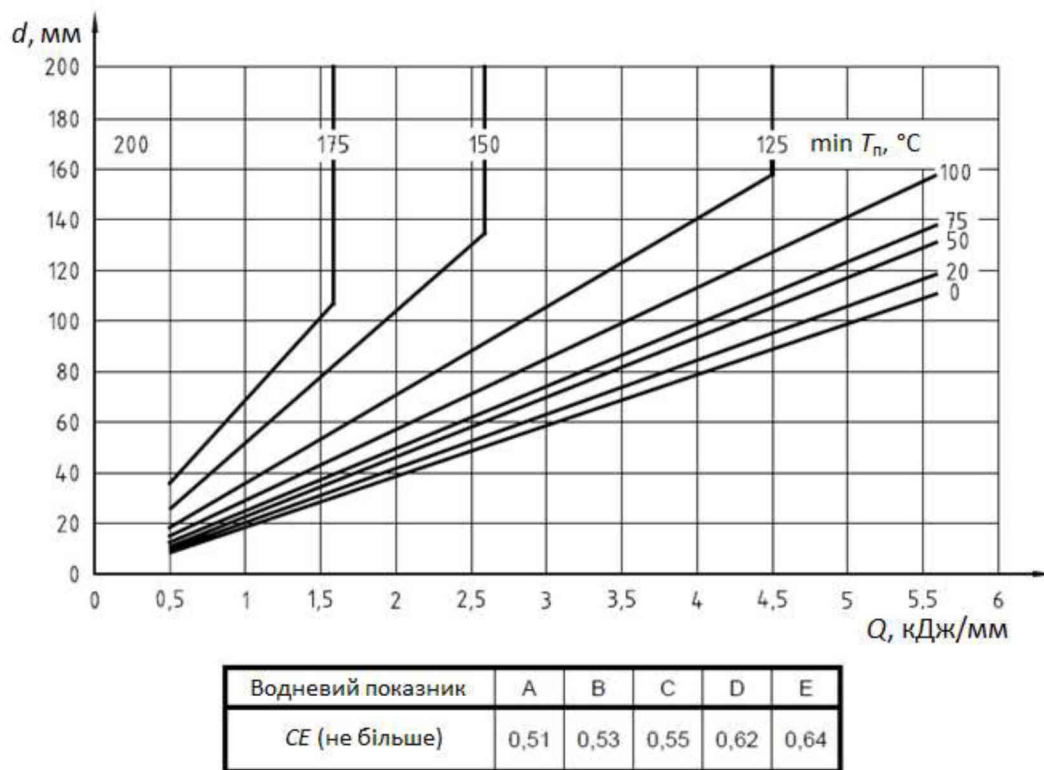


Рис. 7А. Температурний режим зварювання сталей з визначеним водневим показником та вуглецевим еквівалентом *CE*

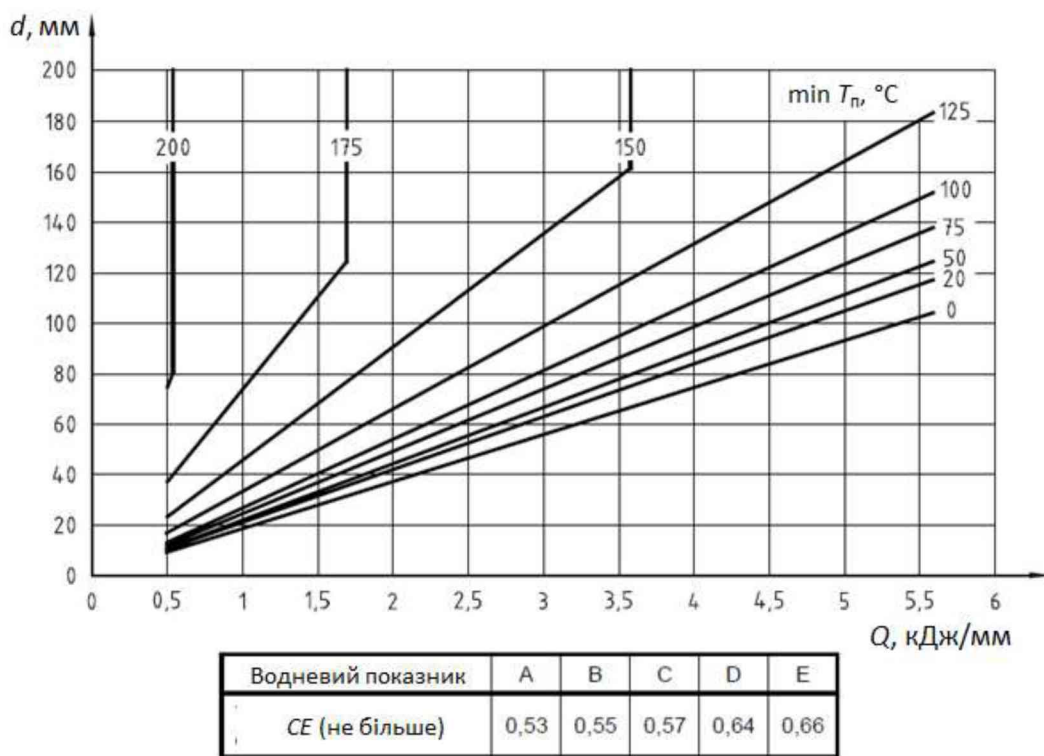


Рис. 8А. Температурний режим зварювання сталей з визначеним водневим показником та вуглецевим еквівалентом *CE*

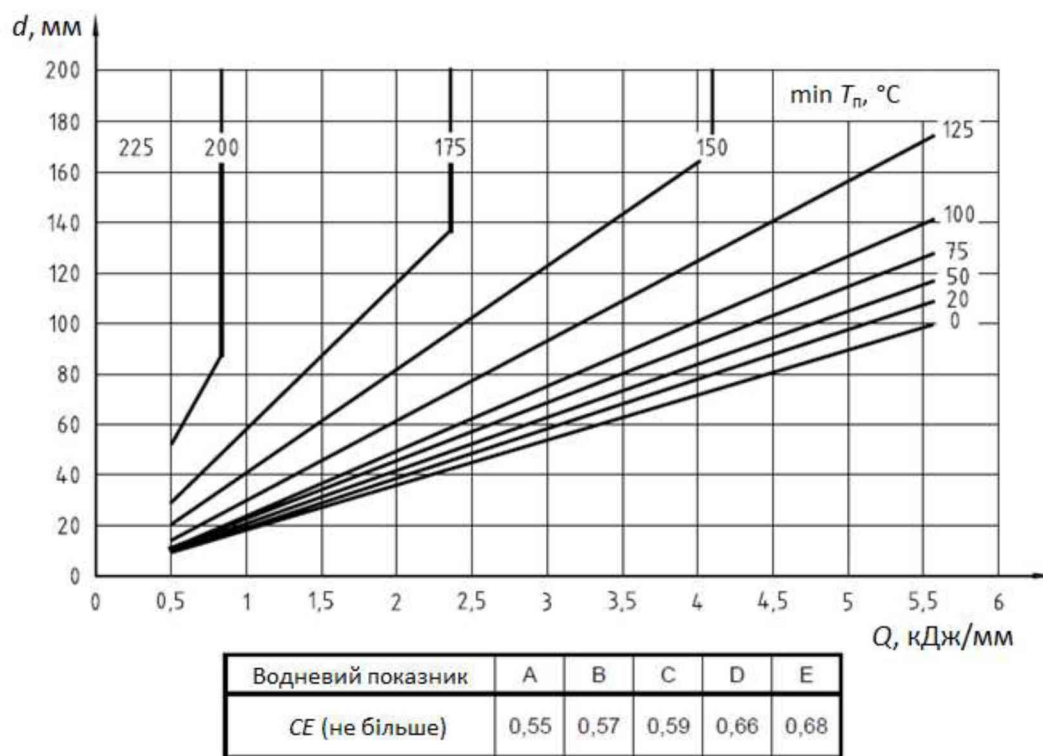


Рис. 9А. Температурний режим зварювання сталей з визначеним водневим показником та вуглецевим еквівалентом CE

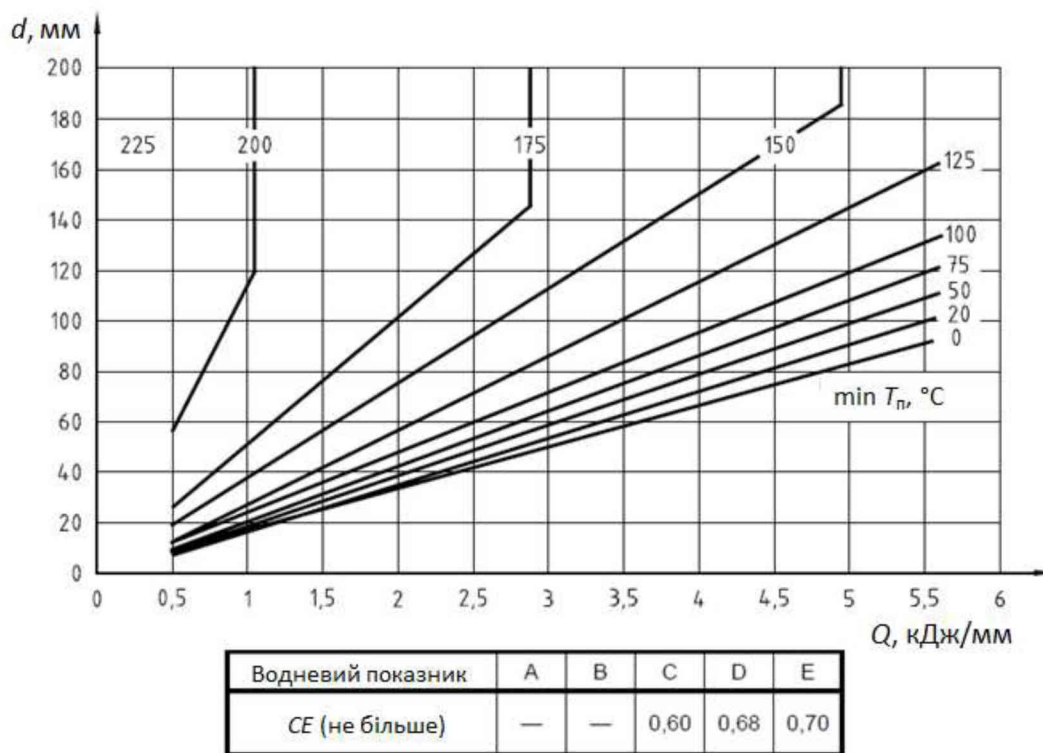


Рис. 10А. Температурний режим зварювання сталей з визначеним водневим показником та вуглецевим еквівалентом CE

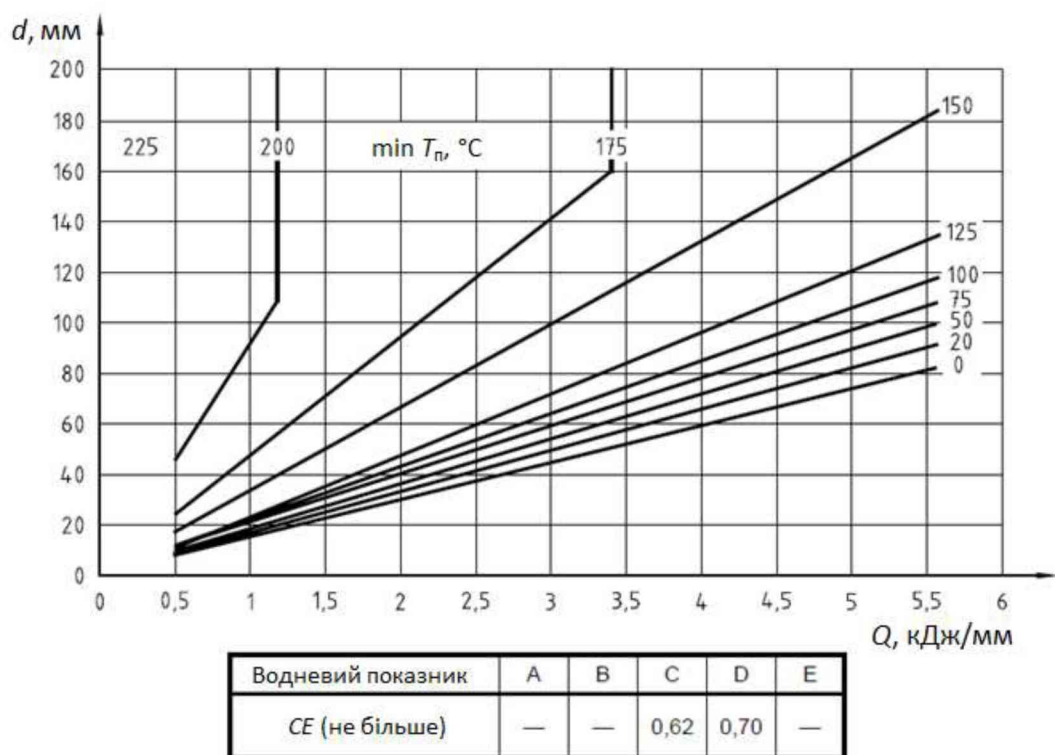


Рис. 11А. Температурний режим зварювання сталей з визначенням водневим показником та вуглецевим еквівалентом CE