

621.78

C325



Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія

Б. П. Серeda
І.В. Кругляк

ТЕРМІЧНА ОБРОБКА

**Методичні вказівки
до практичних занять**

*для студентів ЗДІА
спеціальності "Обробка металів тиском "*

**Запоріжжя
2004**

Вступ

Методичні вказівки підготовлені відповідно до програми курсу "Термічна обробка". Ця дисципліна є базовою для підготовки грамотних інженерів. Методичні вказівки охоплюють головні розділи і теми курсу. Викладено основні формули і методика розрахунку, методика рішення задач за визначенням напруг при миттєвій зміні температури поверхні:

- тривалість нагріву сталі;
- температурні напруги в металі при нагріві;
- визначення напруг при лінійній зміні температури поверхні;
- напруги в металі при нагріві в печі з постійною температурою.

Методичні вказівки мають за мету допомогти студентам виконати практичні завдання з курсу: „Термічна обробка“.

1 НАГРІВ СТАЛІ І СПЛАВІВ

1.1 ОСНОВНІ ФОРМУЛИ І МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ

В загальному ланцюзі технологічного процесу гарячої обробки металу тиском нагрів металу вважається однією з істотних ланок.

Правильний режим нагріву злитків або заготовок забезпечує високі техніко-економічні показники роботи прокатного стану, а саме зменшується витрата металу, палива, енергії на одиницю годних виробів, підвищується продуктивність праці і якість прокатних виробів, що зрештою відображається на основному показнику роботи прокатних цехів — собівартості товарної продукції.

Критерії оптимальності нагріву сталі і сплавів, які включають оптимізацію сумісних техніко-економічних показників нагрівальних печей і прокатного стану, розглянуті З. А. Малим з використанням математичного апарату варіаційного числення і принципу максимуму [1].

Теорія нагріву сталі і сплавів і причини утворення всіх видів браку, виникаючі при неправильному режимі нагріву металу, детально є розглянуті в роботах [2-5,6-9]. Нижче приведені задачі і методика їх рішень в межах вимог виробничої практики. До них відносяться визначення таких технологічних параметрів, як температура нагріву сталі, тривалість, або час нагріву сталі і напруги в металі при нагріві, температура нагріву сталі.

Температурний режим нагріву сталі і сплавів перед гарячою обробкою тиском (плющення, кування) залежить головним чином від властивостей металу в литому (злиток) і деформованому (заготовка) станах. При встановленні температурного режиму для заданого металу необхідно урахувати наступні дані:

- 1) хімічний склад і спосіб виплавки сталі або сплаву;
- 2) механічні властивості металу при високих температурах;
- 3) конструкцію нагрівальної печі;
- 4) форму, розмір і розташування тіла, що нагрівається, в печі.

У виробничих умовах задачі за визначенням температури нагріву металу можуть зустрічатися в різних варіантах, які детально розглянуті в роботах за технологією нагріву сталі, перерахованих вище. Найцікавіші задачі по нагріву металу, має велике практичне значення, можна сформулювати в двох варіантах:

а) для даного металу вимагається визначити максимально допустиму кінцеву температуру нагріву;

б) при заданих температурі печі і часу перебування металу в ній визначити температури поверхні і середини тіла, що нагрівається.

В табл. 1 представлені позначення величин, що використовуються в подальших розрахунках.

Теоретичне визначення температури нагріву металу перед плющенням злитків або заготовки ґрунтується на діаграмах стану сплавів.

Для визначення температури нагріву металу вуглецевих сталей користуються класичною діаграмою Geurensa — діаграмою стану сплаву Fe—C (рис 1). Є подібного роду діаграми і для інших сплавів [10 - 13].

Теоретична температура нагріву сплаву повинна бути близькою до температури лінії солидуса, оскільки пластичні властивості металу в межах температурного інтервалу гарячої обробки поліпшуються з підвищенням температури. Проте це справедливо не для всіх сплавів.

Таблиця 1

Найменування величини	Умовне позначення	Одиниці вимірювання в системі СІ	Зв'язок з одиницями інших систем
Коефіцієнт теплопроводності	λ	вт/(м·град)	860кал/(м·г·град)
Питома масова теплоємність	C_p	дж/(кг·град)	0,24 кал/(кг·град)
Коефіцієнт температуро-проводності.....	$\alpha = \lambda / C_p$	м ² /г	860кал/(м·г·град)
Коефіцієнт теплопередачі і теплоотдачі	α	вт/(м ² »град)	860кал/м ² ·г
Поверхнева щільність теплового потоку.....	q τ	вт/м ²	
Час (тривалість нагріву)	τ_1	г	
Час при ступінчатому нагріві окремо для кожної ступені	τ_2 τ_3 $t_{ГАЗ}$ $t_{ПЧ}$		
Температура газу	$t_{П.Г.}$	°С	
Температура печі.....		°С	
Температура поверхні тіла.....	$t_{С.Т.}$	°С	
Температури середини тіла.....	$t_{О.Т.}$	°С	
Початкова температура тіла.....	$t_{К.Т.}$ $t_{О.Г.}$ $t_{О.ПЧ.}$	°С	
Кінцева температура тіла.....	$\Delta t = t_{П} - t_{С}$	°С	
Початкова температура газу....		°С	
Початкова температура печі...	$\Delta t^{\circ} = t_{П}^{\circ} - t_{С}^{\circ}$	°С	
Різність температури поверхні і середини тіла		°С	
Початкова різність температур поверхні і середини тіла		°С	

Продовження табл. 1

1	2	3	4
Найбільша різниця температур по перетину.....	Δt_{Γ}	$^{\circ}\text{C}$	$T = t + 273,16^{\circ}\text{C}$
Абсолютна температура....	T	$^{\circ}\text{K}$	
Розрахункова товщина тіла.....	S	м	
Радіус перетину циліндра равновеликого по площі перетину з тілом, що нагрівається прямокутного або квадратного перетину....	R	м	0,24 кал/кг
Розрахункова височина циліндра.....	H		
Змінення тепловмісту в різні періоди нагрівання	$\Delta i_1, \Delta i_2, \Delta i_3$	м	0,24 кал/кг
Формули для визначення змін тепловмісту по зонам печі	$\Delta i_1 = i_1 - i_0$ $\Delta i_2 = i_2 - i_1$ $\Delta i_3 = i_3 - i_2$	Дж/кг	0,24 кал/кг
Середні поверхневі щільності теплових потоків.....	$T_{\text{уход.г}}$	Дж/кг	
Абсолютна температура продуктів горіння, що улітають	k_1		
Поправочний коефіцієнт часу нагрівання, що враховує форму тіла.....	$z = \frac{60\tau}{S}$	Безрозмірний(для платин $k_1 = 1$, для циліндра $k_1=2$, для шару $k_1 = 3$)	
Питома тривалість нагрівання.....	$G_{\text{пiч}}$	хв./см	
Однократна загрузка печі...	G	кг	
Часова продуктивність печі	$I_{\text{п.дл.}}$	кг/ч	
Довжина робочого простору печі		м	

1	2	3	4
повна	$l_{п.дл.}$	м	
активного пода	$l_{акт.}$	м	
камера, що подогріває...	$l_{под.}$	м	
зварочної камери.....	$l_{звар.}$	м	
Температурний градієнт	Grad t	°C/м	
Критерій Фур'є	$F_0 = \frac{a\tau}{S^2}$	Безрозмірний	
Критерій Біо	$Bi = \frac{aS}{\lambda}$	Безрозмірний	
Швидкість нагрівання.....	C	°C/ч	
Коефіцієнт лінійного теплового розширення металлу.....	α_1	град ⁻¹	
Коефіцієнт об'ємного розширення металлу	$\beta = 3 \alpha_1$	град ⁻¹	
Відношення маси тіла, що нагрівається до його поверхні	$\frac{M}{F}$	кг/м ²	

З виробничої практики відомо, що дуже висока температура сталі і сплавів з підвищенням пластичності викликає ряд перерахованих нижче небажаних явищ, які погіршують прокочуваність металу і його якість [14].

1. Метал може вийти перегрітим або перепаленим, що приводить до зниження пластичності сталі унаслідок збільшення розміру зерен. Крім того, перепалена сталь з оплавленими межами зерен стає крихкою і є браком.

2. Дуже висока температура нагріву сприяє підвищенню температури кінця плющення. В цьому випадку унаслідок процесу рекристалізації кінцева продукція може вийти грубозернистий, із зниженими механічними властивостями. В заевтектоїдних вуглецевих сталях при високих температурах кінця плющення по межах зерен утворюється сітка карбиду (цементитна), а в окремих випадках дуже груба сітка, невіддатлива усуненню термічною обробкою.

3. При високих температурах сталі можливий брак по обезвуглецюванню сталі, що особливо відображається на якості інструментальних сталей, головним чином швидкорізальних.

4. Збільшуються втрати металу від чаду.

Ураховуючи перераховані вище труднощі при визначенні оптимальної температури нагріву металу перед плющенням, Н. Ю. Тайц [15] і М. Л. Зарощинський [16] рекомендують розраховувати температуру нагріву вуглецевої сталі по емпіричній формулі:

$$t_H = t_{\text{СОЛ}} (373 - 473^\circ\text{K}) \quad (1.1)$$

де t_H - температура нагрівання сталі;
 $t_{\text{СОЛ}}$ - температура по лінії солідуса.

При підвищенні змісту вуглецю в сталі максимальна температура нагріву знижується: до 1350°C при $0,1\%$ С, $1250-1270^\circ\text{C}$ при $0,2\%$ С, $1200-1220^\circ\text{C}$ при $0,4\%$ С і $1180-1200^\circ\text{C}$ при $0,6\%$ С.

Для інструментально-вуглецевої сталі із змістом вуглецю $0,8$; $1,0$ і $1,5\%$ рекомендуємо самостійно знайти температуру нагріву металу, користуючись діаграмою Fe-C.

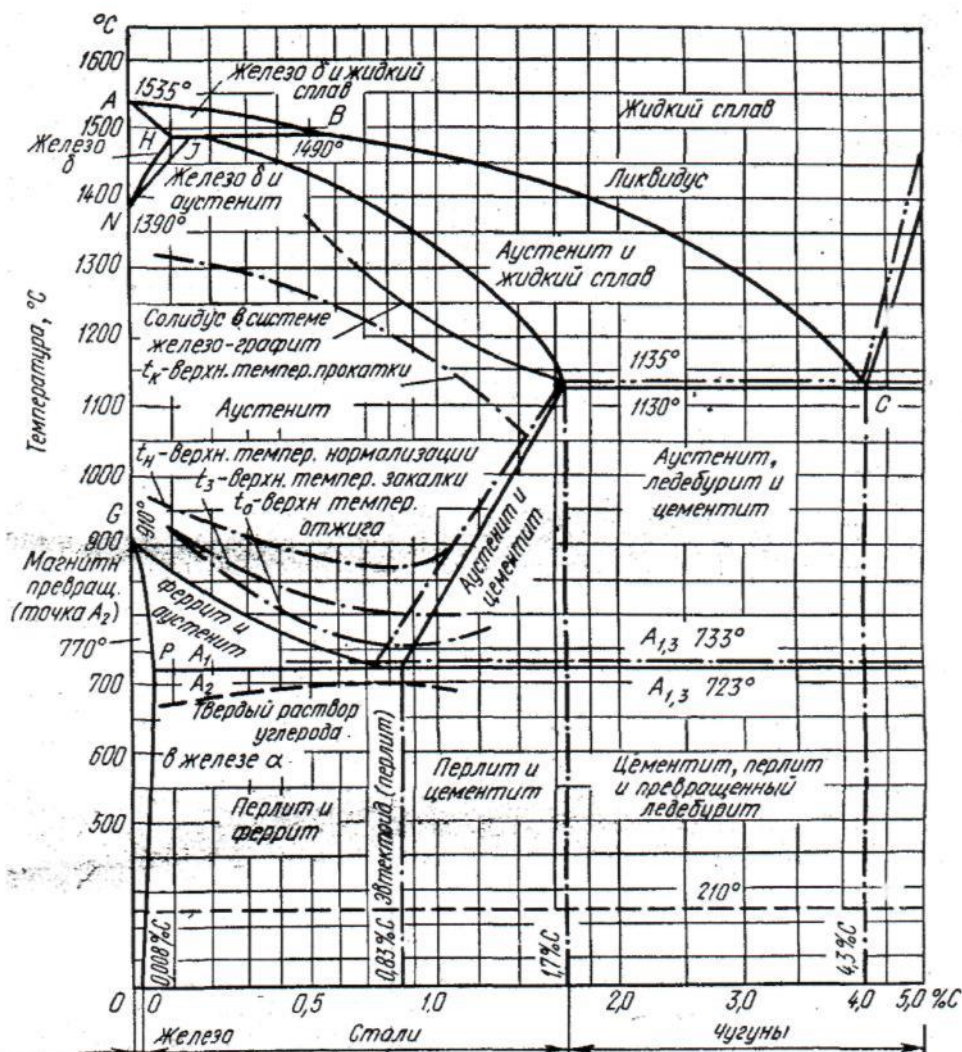


Рисунок 1 - Діаграма стану вуглецевої сталі (t_k - температура нагрівання сталі перед прокатуванням)

При визначенні температури кінця нагріву сталі в печі необхідно мати на увазі наступні міркування:

1) метал при вибраній температурі повинен мати однофазну структуру твердого розчину, оскільки багатофазна структура характеризується

меншою пластичністю, ніж гомогенна або однофазна у зв'язку з відмінністю механічних властивостей фаз при високих температурах;

2) вибрана температура нагріву металу повинна забезпечити, до певної міри, інтенсифікацію дифузійного процесу, тобто мимовільне вирівнювання концентрації хімічних елементів, карбиду ліквачії і інших шкідливих скупчень в сплаві.

Тривала витримка при 1000—1150°C сприяє видаленню деякої кількості водню із сталі шляхом дифузії і тим самим знижує чутливість її до флокенам. Особливо це відноситься до таких флокеночутливих сталей, як шарикоподшипнікова, конструкційна, хромонікелева і ін.

Температура нагріву металу також визначається його механічними властивостями при високих температурах.

В заводській практиці при визначенні температури нагріву зливків і заготовок у момент видачі їх з печі користуються функціональною залежністю температури від механічних властивостей сплаву, приймаючи за критерій пластичності відносне подовження $\delta = \text{ДІЛ} - 100 \%$; поперечне звуження $\psi = F_0 - F_1 / F_0 \cdot 100 \%$; результати випробувань на кручення (по числу оборотів випробовуваного зразка до його руйнування) і ударну в'язкість $a_n [105 \text{ н} \cdot \text{м} / \text{м}^3 (\text{кг} \cdot \text{м} / \text{см}^2)]$.

Одночасно з цими випробуваннями визначають міцність металу. Міцність металу характеризується межею міцності і твердістю.

Способи механічних випробувань металу при високих температурах достатньо детально розглянуті в роботах [2, 17] і ін.

Результати механічних випробувань металу при високих температурах представляють у вигляді графіків, по яких визначають інтервал пластичності випробовуваного металу і проводять вибір температури металу перед прокатуванням і в кінці неї. Один з таких графіків приведений на Рис. 2.

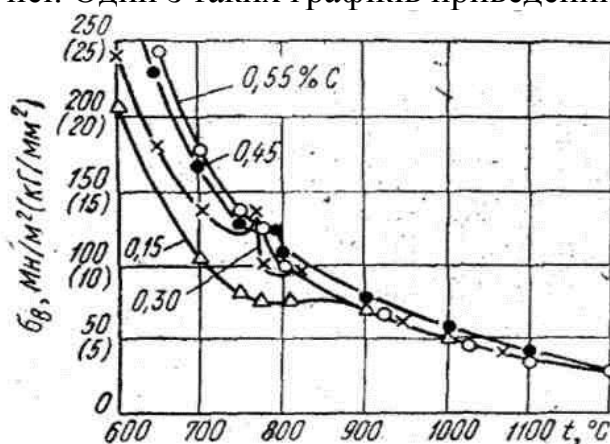


Рисунок 2 - Вплив температури на межу міцності нелегованої сталі з різним вмістом вуглецю

Температуру нагріву зливків з вуглецевих і легованих сталей перед прокатуванням і температуру в кінці прокатування можна визначити по табл. 2. Пояснення до табл. 2:

1) стали 18ХНВА, 30ХГСА, 60С2 володіють великою схильністю до наклепу при температурах нижче 850°С;

2) для зменшення полосчатості в структурі готового сорту із сталі 15 температура кінця прокатування повинна бути не нижчим 850 С;

Температури початку і кінця прокатування різних сталей [2]

3) сталь У7 при температурі нижче 750° С схильна до утворення полосчатої структури, а вище 900° С— до випадання феритної складової;

Таблиця 2

Температура початку і кінця прокатування різних сталей [2]

Вид сталі	Марка сталі	температура початку прокатування, °С	Температура кінця прокатування, °С
Конструкційна	15	1260	≥ 850
	12ХН3А	1260	≥ 800
	18ХНВА	1220	≥ 850
	30ХГСА	1240	≥ 850
	60С2	1140	≥ 800
Інструментальна	У7	1220	750-900
	У12А	1200	800-850
	ЄИ366	1150	≥900
	Х12М	1170	≥850
	Р9	1190	≥900
	Р18	1230	≥900
Окаліностійка, нержавіючі, жароміцні, а також стопи з високим омичним опіром	Х9С2	1240	>900
	1Х13	1280	≥850
	Х17	1100	Не обмежені
	Х28	1100	750-850
	1Х25Ю5	1100	≤800
	1Х18Н9	1250	≥850
	Х18Н11Б	1200	≥900
	Х18Н25С2	1180	≥850
	Х23Н18	1200	≥900
	Х13Н4Г9	1180	≥900
	1Х14Н14В2М	1200	≥850
	Х15Н60	1160	≥850
	Х20Н80	1170	≥800

4) для запобігання освіти в готовому крупному сорті із сталі У12А сітки карбиду температуру кінця прокатування приймають не вище 850° С, а при прокатуванні сорту дрібних розмірів із стороною (20 мм) для запобігання чорного зламу — не нижче 800° С;

5) щоб уникнути утворення графіту в поверхневих шарах виробів із сталі ЗИЗ66 температура кінця прокатування цієї сталі повинна бути не нижчим 900°С;

6) для сталі Х28 температура кінця прокатування повинна бути в межах 750—850° С, оскільки при більш високій температурі готовий прокат має крупне зерно.

Сталі аустенітного класу володіють схильністю до швидкого наклепу, тому для них температуру кінця прокатування приймають не нижче 850° С.

Окрім різноманітних методів визначення температури нагріву сталі перед прокатуванням, заснованих на використуванні діаграм стану сплавів і механічних випробувань металу при високих температурах, у виробничій практиці температуру поверхні t_n і середини t_c зливка або заготівки визначають також за даними $t_{газ}$, t і t_{0T} . Вирішимо цю задачу аналітичним способом з використанням критерійних функцій. Для цього скористаємося методом Л. М. Марієнбаха [18].

1. По таблицях, що є в роботах [19 і 20], встановлюють фізичні константи для металу (див. табл. 1): λ , c_p , ρ ; $a = \lambda / c_p \rho$ (середні значення в інтервалі температур металу при посадці металу в піч і заданій температурі нагріву).

2. Визначають коефіцієнти теплопередачі α по формулі Шака з поправкою Хейлінгенштедта:

$$\alpha = 50 + 0,3(t_{газ} - 700^\circ\text{C}) \quad (1.2)$$

3. Знаходять відношення $\alpha S/2 \lambda$,

де S - сторона або діаметр тіла, що нагрівається.

4. Визначають відношення $4\alpha\tau/S$, де τ — час нагріву металу, що розраховується по методу Л. М. Марієнбаха.

5. По знайдених $\alpha S/2 \lambda$, і $4\alpha\tau/S^2$ за допомогою діаграм (рис. 3-6) знаходять значення відносин:

$$\frac{t_n - t_{газ}}{t_0 - t_{газ}} \quad ; \quad \frac{t_c - t_{газ}}{t_0 - t_{газ}}$$

6. З цих відносин визначають t_n і t_c . Теоретичні методи визначення температури нагріву металу не можуть претендувати на абсолютний збіг з даними практики. Необхідна додаткова перевірка правильності рішення задачі в лабораторних і виробничих умовах. При проектуванні прокатних станів, що знов будуються, або теоретична температура перепалу і максимальна температура нагріву [4 - 6] при розробці технології прокатування нових сталей і сплавів оптимальні режими нагріву металу розробляють на базі досвідчених

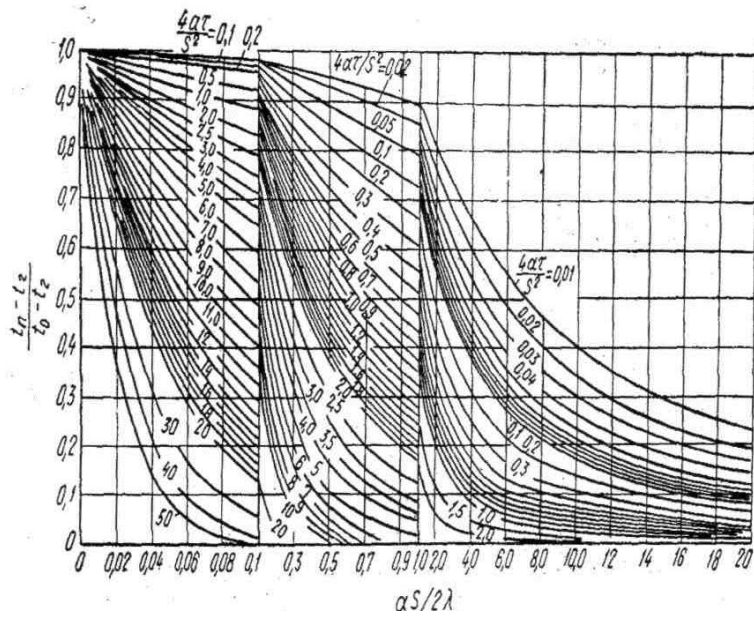


Рисунок : 3 - Графік температур Шака для поверхні пластин

даних з обґрунтуванням останніх попередніми розрахунками по розглянутих нижче методах.

Гранична температура нагріву металу перед прокатуванням знаходиться в нерозривному зв'язку з швидкістю або часом нагріву. Чим вище температура нагріву, тим більше повинна бути швидкість нагріву.

При невідповідності температури нагріву його швидкості неминуче виникнення браку у вигляді перегріву або перепалу.

Температури, що рекомендуються, нагріву конструкційних і інструментальних сталей є приведені в табл. 2 і 3.

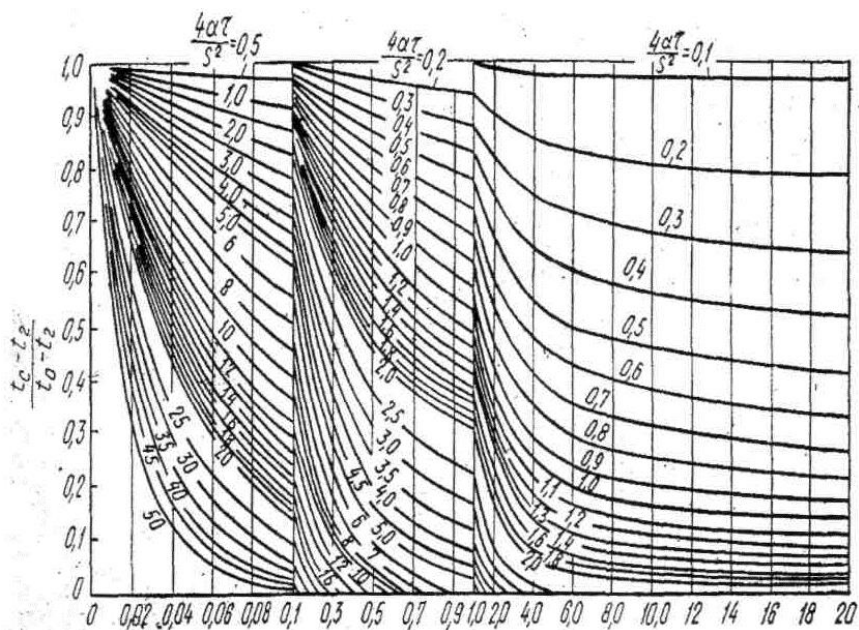


Рисунок : 4 - Графік температур Шака для середини пластин

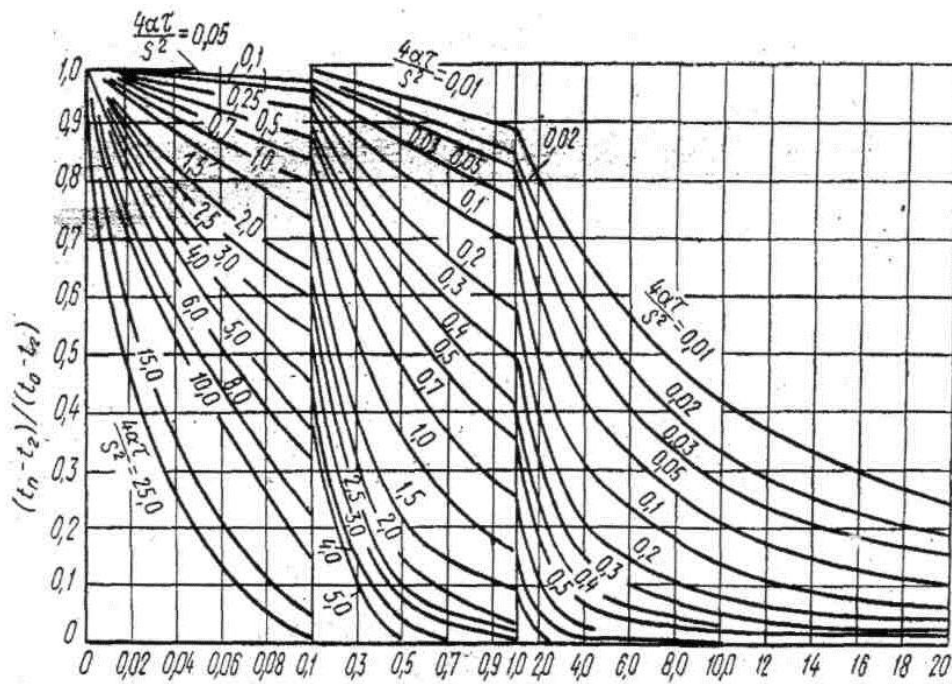


Рисунок 5 - Графік температур Шака для поверхні циліндра

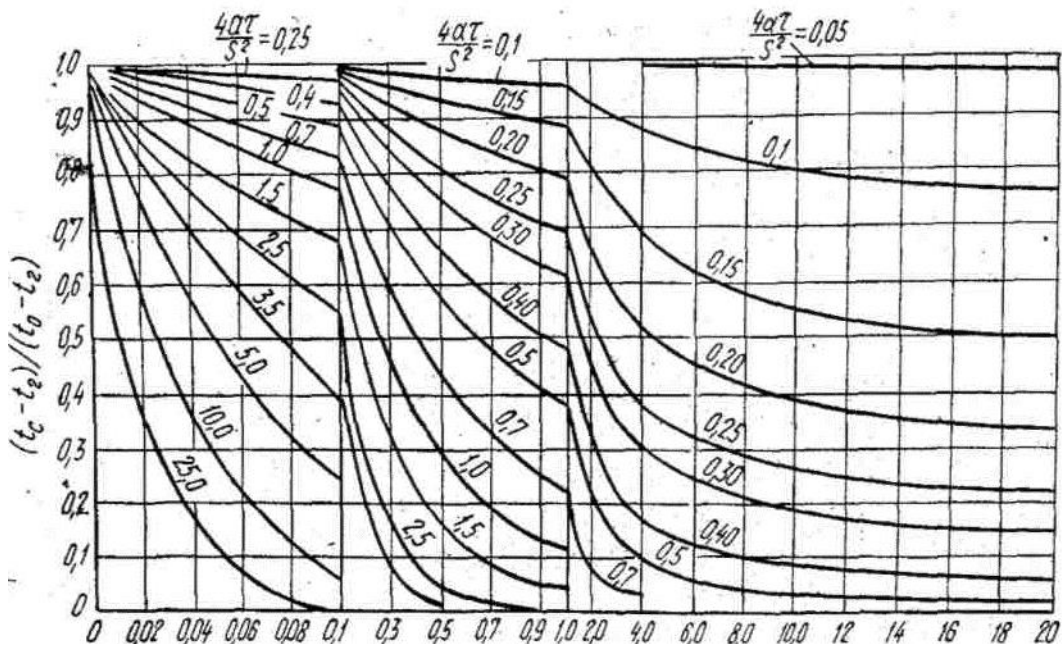


Рисунок 6 - Графік температур Шака для осі циліндра

Тривалість нагріву сталі

В технології нагріву сталі істотну роль грає час нагріву сталі і сплавів. Правильне визначення часу нагріву не тільки забезпечує якість, що вимагається, прокатних виробів, структуру і механічні властивості але і створює сприятливі умови деформації металу при прокатуванні. Рівномірно прогрітий метал характеризується прямолінійним виходом металу з валків, без

вигинів смуги, без дрантя на її поверхні. Такий метал «м'яко» захоплюється валками без ударів. В цьому випадку досягається безаварійна експлуатація і високі техніко-економічні показники роботи стану, забезпечуються безпечні умови праці.

Слід зазначити, що до цих пір не розроблені математичні методи визначення часу нагріву металу, які дозволили б одержувати результати розрахунку, точно співпадаючі з практичними даними.

Для визначення сумарної тривалості нагріву металу в печі і часі нагріву металу по зонах нагрівальної печі скористаємося тільки кінцевими формулами, приведеними в роботах [4 - 6]. При розрахунках використовуємо позначення перераховані в табл. 1.

Нижче приведені розрахункові формули різних авторів, по яких можна визначити тривалість нагріву сталі.

Формули Н. Ю. Тайца [4]

При двохступінчатому нагріванні:

$$\tau_1 = \frac{Rp\Delta i_1}{k_1 q_1}$$

$$\tau_1 = \frac{Rp\Delta i_2}{k_2 q_2} \quad \text{ч; } \} \quad (1.3.)$$

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \quad \text{ч;}$$

$$z = \frac{60\tau}{S} \quad \text{мин/сек.}$$

При трьохступінчатому нагріванні:

$$\tau_1 = \frac{Rp\Delta i_1}{k_1 q_1} \quad \text{ч;}$$

$$\tau_1 = \frac{Rp\Delta i_2}{k_2 q_2} \quad \text{ч; } \} \quad (1.4.)$$

$$\tau_1 = \frac{Rp\Delta i_3}{k_3 q_3} \quad \text{ч;}$$

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \quad \text{ч;}$$

Час нагріву тіл визначають по формулі Н. Ю. Тайца, отриманій на підставі робіт Би. В. Старка [4]:

$$\tau = \frac{M}{F} \cdot \frac{C_p}{\alpha} \ln \frac{t_{пнч} - t_{о.т.}}{t_{пнч} - t_{к.т.}} \quad (1.5)$$

Тонке тіло від масивного за даними Р. П. Іванцова відрізняється величиною критерію Біо: для тонкого тіла $Bi \leq 0,25$, для масивного тіла $Bi \geq 0,50$, для тіла середніх розмірів $0,25 < Bi < 0,50$.

Метод Л. М. Марієнбаха [5]

Тривалість нагріву сталі t визначають в наступній послідовності:

- 1) знаходять дані про фізичні якості матеріалу, що нагрівається, що характеризується наступними параметрами: λ , c_p ; ρ ; α (див. табл. 1);
- 2) визначають коефіцієнт теплопередачі a ;
- 3) визначають величину $\alpha S/2 \lambda$;
- 4) обчислюють величину

$$\frac{t_{II} - t_{ГАЗ}}{t_0 - t_{ГАЗ}} \quad \text{або} \quad \frac{t_{ГАЗ} - t_B}{t_{ГАЗ} - t_0}$$

- 5) по діаграмах мал. 3-6 знаходять значення $4\alpha\tau/S^2$;
- 6) з урахуванням значення $4\alpha\tau/S^2$ визначають величину t , ч (див. задачу № 17).

Метод Н.М.Іцковича [6]

Н.М. Іцкович запропонував наступні формули для наближених розрахунків часу нагрівання по зонах печі, ч:

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{G_{ПЧ}}{G}; \\ \tau_{ПОД} &= \tau \frac{l_{ПОД}}{l_{АКТ}}; \\ \tau_{СВАР} &= \tau \frac{l_{СВАР}}{l_{АКТ}}; \\ \tau_{ТОМ} &= \tau \frac{l_{ТОМ}}{l_{АКТ}}; \end{aligned} \quad (1.6)$$

Час нагріву металу в кожній зоні, отримане по формулах (1.6.) перевіряють по інших формулах:

$$\begin{aligned} \tau_{ПОД} &= \frac{287\Delta i_{ПОД} S\sqrt{S}}{(T_{УХОД.Г} / 100)^2 \sqrt{\Delta t}}; \\ \tau_{СВАР} &= \frac{28\Delta i_{СВАР} S^2}{\sqrt{\Delta t_1 \Delta t_2}}; \\ \tau_{ТОМ} &= \frac{112,5\Delta i_{ТОМ} S^2}{\sqrt{\Delta t_2 \Delta t_3}}; \end{aligned} \quad (1.7)$$

Визначення значень Δi , Δt_1 , Δt_2 і Δt_3 детально розглянуто в роботі [6].

Визначення тривалості нагріву металу до температури початку прокатування по методах, приведених в роботах [4-6], можна рекомендувати тільки інженерам проектних організацій, оскільки для цієї роботи буде потрібно щодо багатьох часу.

У виробничих умовах для вирішення цієї задачі використовують перераховані нижче напівемпіричні формули, добре перевірені на практиці.

1. Формула М.М.Доброхотова [22]:

$$\tau = k_1 D \sqrt{D} \quad \text{ч,} \quad (1.8.)$$

де τ — час нагріву від 0 до 1200° С;

D — діаметр круглої або сторона квадратної заготовки;

k_1 — постійний коефіцієнт ($k_1 = 10$ для м'якої сталі $k_1 = 20$ для високолегованої сталі). Аналогічна формула приведена в роботі [23]:

$$\tau = a k_1 D D \sqrt{D} \quad \text{ч,} \quad (1.9.)$$

де a — 1÷4 — коефіцієнт, що ураховує спосіб укладання заготовок в печі (рис. 7), тобто коефіцієнт, що ураховує нерівномірність підведення тепла з різних сторін заготовки;

k_1 — досвідчений коефіцієнт, що ураховує температуропровідність сталі $k_1 = 12,5$ для вуглецевої і легваної сталі і $k_1 = 20 \div 25$ для високолегованої;

D — розмір поперечного перетину заготовки.

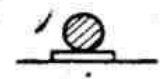
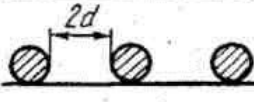
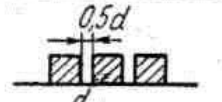
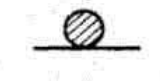
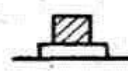
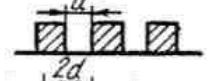

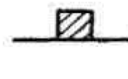
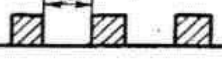
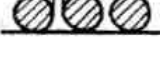
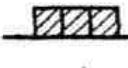
Расположение заготовок	τ	Расположение заготовок	τ	Расположение заготовок	τ
	1		1,3		2,2
	1		1		2
	2		1,4		1,6
	1,4		4		

Рисунок 7 - Вплив розташування заготовок в піч під час нагрівання

2. Формула Н. Ю. Тайца [21]:

$$\tau = (7,5 + 0,05S)S \quad \text{хв,} \quad (1.10.)$$

де S - товщина зливка. Формула придатна для визначення часу нагріву заготовок з низьковуглецевих сталей в методичних печах при температурі газів 800-850° С, що йдуть.

3. Формула, рекомендована Всесоюзною конференцією в 1938 р. по стахановських методах термічної обробки чорних металів:

$$\tau = \frac{S^n}{a} \quad (1.11.)$$

де S — товщина металу, що нагрівається, м;
 n — показник ступеня, визначуваний досвідом;
 a — коефіцієнт температуропроводності.

Відповідно до досвідчених даних величина питомої тривалості нагріву зливків 2 змінюється в наступних межах: 12—14 мін/см для вуглецевої і легованої сталі, 21—23 хв/см для шарикоподшипнікової сталі, 8—10 хв/см — для м'якої сталі.

Час нагріву можна визначити по формулі:

$$\tau = kS \quad (1.12.)$$

За останній час в металургійній і машинобудівній промисловості почали використовувати прогресивний, так званий швидкісний, метод нагріву металу [4, 24].

Так, за даними заводу «Електросталь» для зливків з швидкорізальної сталі Р18 тривалість нагріву можна визначити по формулі (1.12.) або

$$\tau = (0,25 \div 0,30)S \text{ ч}, \quad (1.13.)$$

де S — сторона, або діаметр перетину.

Менші значення k приймають для зливків перетином менше 250x250 мм, а великі — для зливків перетином більше 250x250 мм

За даними Ю. М. Чижикова [25], коефіцієнт k вибирають залежно від виду сталі:

Сталь	k
Вуглецева	0,10 - 0,15
Легована конструкційна	0,15 - 0,20
Високолегована конструкційна і спеціальна	0,20 - 0,30
Високолегована інструментальна....	0,30 - 0,40

Цей коефіцієнт тим менше ніж більше теплова потужність нагрівальних печей.

При гарячому садінні зливків тривалість нагріву залежить від їх температури при садінні: вона тим менше ніж вище температура.

Тривалість нагріву гарячих зливків в колодязях можна визначити по формулі:

$$\tau = kS - 0,006 (t - 200) \text{ ч}, \quad (1.14.)$$

де t — температура металу при посадці;

k — коефіцієнт, що ураховує вплив складу сталі і умов нагріву. На

одному з металургійних заводів дійсні графіки нагріву гарячих зливків леговані сталей масою 5000- 6000 кг відповідали наступній залежності:

$$\tau = 7,0 - 0,006(t - 200) \text{ г}, \quad (1.15.)$$

Температурні напруги в металі при нагріві

При нагріві зливка або заготовки перед прокатуванням міняються їх лінійні і об'ємні розміри:

$$l_t = l_0(1 + \alpha_1 t) \quad (A)$$

$$V_t = V_0 (1 + \beta t) \quad (B)$$

По формулі (A) визначаються всі розміри прокочуваної смуги в гарячому стані, що вельми необхідно знати при калібруванні валків.

Біномінальний коефіцієнт $(1 + \alpha_1 t)$ залежно від температури прокатування (при $\alpha_1 = 12,5 \cdot 10^{-6}$ для сталі) має наступні значення:

Температура, °С.....	800	900	1000	1100	1200
$1 + \alpha_1 t$	1,010	1,011	1,012	1,013	1,0145

Температурні напруги в пластині визначаються по формулі:

$$\sigma = \frac{\alpha_1 E (t - t_0)}{1 - \psi'}$$

де E — модуль пружності [для сталі $E = 2 \cdot 10^5$ Мн/м ($2 \cdot 10^6$ кГ/см²)];

ψ' — коефіцієнт Пуассона (для сталі $\psi' = 0,3$);

t — середня температура тіла;

t₀ — температура тіла в перетині, що розглядається, або елементі.

При зміні розмірів тіла, що нагрівається, в ньому виникають температурні напруги: розтягуючі (позитивні) і стискаючі (негативні).

Різні по знаку напруги з'являються в результаті нерівномірного розподілу температури по перетину і по довжині в печі тіла, що нагрівається.

В початковий момент нагріву периферійні шари металу мають більшу температуру, ніж центральні шари. Різниця температур по перетину тіла визначається величиною, іменованою температурним градієнтом grad f⁰ С/м. В центрі перетину зливка або заготовки виникають температурні розтягуючі напруги, а на поверхні — стискаючі. Картина розподілу температурних напруг в пластині при миттєвій зміні температури поверхні представлена на мал. 8.

При визначенні величини термічних напруг в металі при нагріві приймають основні положення з теорії теплопередачі [26].

Теоретичне визначення температурних напруг засновано на формулах теорії пружності. Тому, при рішенні рівнянь теплопровідності з використанням основних положень теорії пружності виходять результати недостатньо повно співпадаючі з практичними даними. Ці результати можна вважати першим наближенням, потребуючим в коректуванні за допомогою експериментальних даних.

В процесах нагріву металу можуть виникати наступні напруги:

- 1) тимчасові (термоупругі);
- 2) структурні;
- 3) пружно-пластичні напруги [4].

Слід зазначити, що термічні напруги небезпечні при нагріві непластичного або мало пластичного металу з гетерогенною структурою, за наявності неметалічних включень, газових пузирів, полон, ліквіації, пусток кристалічної неоднорідності і т.д. Неоднорідність сталі веде до нерівномірного розподілу напруг, а іноді і до концентрації напруг в окремих частинах тіла.

При нагріві таких тіл можливе їх руйнування, якщо величина напруги перевищує межу пружності, близький до межі міцності, оскільки пластичної деформації в цьому випадку практично не буде. Для вуглецевої сталі температура переходу в пластичний стан рівна 400°C .

Структурні напруги не можуть бути небезпечними, оскільки вони виникають при температурах вище 500°C , при яких спостерігається зменшення напруг за рахунок пластичної деформації.

Відомо, що сталь володіє помітною пружністю до 500°C , вище цієї температури сталь практично знаходиться в пластичному стані.

Отже, відзначені вище температурні напруги необхідно урахувати при нагріві від 0 до 500°C особливо для мало пластичних сталей (типу P18) і сплавів. Напруги при пружно-пластичному стані металу менш небезпечні, ніж термоупругі, із вказаних вище причин.

Разом з цим слід мати на увазі залишкові напруги, які утворюються після повного охолодження металу в ізложницях і які, отже, є в металі перед посадкою його в піч.

З огляду на те, що залишкові напруги мають знаки, однакові з напругами, що виникають при нагріві, ті і інші напруги при нагріві підсумовуються. Величина і розподіл температурних напруг залежить від умов нагріву від теплофізичних і механічних властивостей речовини, розмірів і форми тіла.

Нижче розглянуто визначення напруг в металі при нагріві для випадків: миттєвої зміни температури поверхні тіла, лінійного закону зміни температури поверхні тіла, нагріву в печі з постійною температурою.

При рішенні подібних задач використовують формули Н. Ю. Тайца [4].

1.2 Методика рішення задач за визначенням напруг при миттєвій зміні температури поверхні

Задача № 1 (див. табл. 1). Визначити температурні напруги в різних точках перетину тіла, виходячи з таких умов його нагріву:

- 1) миттєва зміна температури поверхні;
- 2) температура тіла до посадки в піч $t_0^{\circ}\text{C}$;
- 3) температура в робочому просторі печі, $t_{\text{п}}^{\circ}\text{C}$;
- 4) форма тіла — плита завтовшки 2S;
- 5) залишкові напруги в тілі відсутні.

Матеріал плити — сталь, що має наступні фізико-механічні параметри:

модуль пружності E , коефіцієнт Пуассона для сталі $\psi' = 0,3$.

Рішення

Відшукувані напруги в будь-якій точці перетину тіла, що нагрівається знаходять по формулі Н. Ю.Тайца:

$$\sigma = \frac{\alpha_1 E (t_0 - t_{II}) f(a\tau; x)}{(1 - \psi') S^2 S} \quad (1.16.)$$

1. Для вирішення рівняння (1.16.) вимагається знайти значення критерію Фур'є $\alpha\tau/S^2$.

2. Прийmemo за початок координат центр перетину плити і розділимо відстань від поверхні тіла до його центру на декілька ділянок: x_1, x_2, \dots, x_n .

3. Після цього знаходять безрозмірне відношення однорідних величин, так званий симплекс: $x_1/S, x_2/S, \dots, x_n/S_n$.

4. За даними $a\tau/8^2$ і $x/8$ по графіку (мал. 9) визначають значення функції f'' ($\alpha\tau/S^2; x/S$). Знайдені члени рівняння (1.16.) дозволяють легко визначити напругу в будь-якій точці перетину плити і побудувати графік розподілу напруг (див. рис. 8).

З цією задачею технологам доводиться мати справу при визначенні допустимої температури в посадочному вікні нагрівальних печей при завантаженні металу, чутливого до нагріву особливо зливків з литою структурою і металу з малим коефіцієнтом теплопровідності λ типу швидкорізальних сталей.

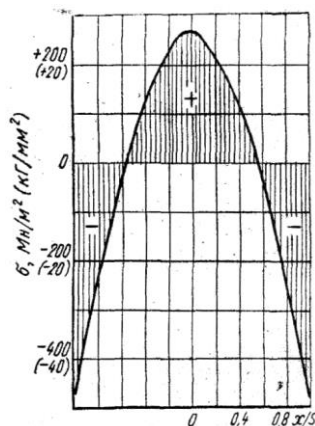


Рисунок : 8 - Графік функції $f''(\alpha\tau/S^2; x/S)$ для температурних напружень при миттєвому зміні температури поверхні

Визначення напруг при лінійній зміні температури поверхні

Задача №2 [4]. Сталева плита завтовшки $2S$ з відомими фізико-механічними параметрами нагрівається в печі з двох сторін з рівномірною швидкістю s . Побудувати графік зміни температурних напруг в процесі нагріву

якщо в початковий момент температура рівна нулю і ніяких напруг в плиті не

було.

Рішення

Напруги в плиті є функцією часу нагріву (τ), відносин (x/S) і швидкості нагріву (c) і визначаються рівнянням:

$$\frac{\alpha(1-\psi')}{E} \frac{1}{\alpha_1 c \tau} = \frac{1}{6} \cdot \frac{S^2(1-3x^2)}{\alpha \tau S^2} + \frac{S^2 f(a\tau; x)}{\alpha \tau S^2 S} \quad (1.17.)$$

При достатньо великому проміжку часу $\tau \geq S^2/\alpha$ — функція Γ приймає таке мале значення, що їм можна нехтувати. В цьому випадку рівняння (1.17.) прийме вигляд:

$$\sigma_y = \sigma_z = \frac{\alpha_1 E}{(1-\psi')} \cdot \frac{c S^2 (1-3x^2)}{6 \alpha S^2} \text{ МН/М}^2 \quad (1.18.)$$

Методика рішення даної задачі в основному ідентична методиці рішення задачі № 1.

З рівняння (1.17.) визначають напруги σ_y і σ_z

$$\sigma_y = \sigma_z = \frac{\alpha_1 E}{(1-\psi')} \cdot \frac{c S^2 (1-3x^2)}{6 \alpha S^2} + \frac{f(a\tau; x)}{S^2 S}; \text{ МН/М}^2 \quad (1.19.)$$

Функцію $f(a\tau/S^2; x/S)$ визначають по графіку (рис. 9) для різних значень x/S і часу τ .

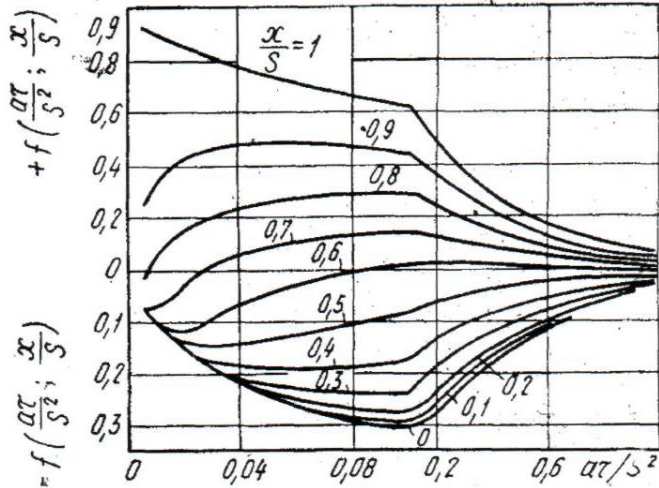


Рисунок ; 9 - Графік функції $f(a\tau/S^2; x/S)$ для температурних напружень в пластині при лінійному вимірюванні температури поверхні

За наслідками розрахунків для всіх проміжків часу нагріву і значень x (відстань від центру перетину тіла до його поверхні) будується графік, подібний графіку, приведеному на рис. 10.

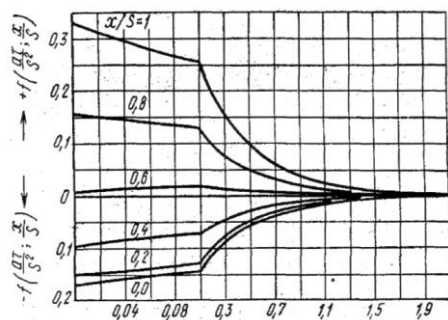


Рисунок 10 - Температурні напруження в пластині при лінійному вимірюванні температури поверхні

Для побудови графіка складають таблицю за формою табл. 4.

Таблиця 4 **Результати розрахунків**

Час, г	x/S = 1			x/S = 0,8			x/S = 0,6		
	f	σ		f	σ		f	σ	
		Мн/м ²	кг/мм ²		Мн/м ²	кг/мм ²		Мн/м ²	кг/мм ²
0,1	0,264	-87,8	-8,78	0,135	-22,9	-2,29		7,25	0,725
0,2	0,212	-154	-15,4	0,11	-54,7	-5,47	0,019	2,16	0,216
0,3	0,17	-207,5	-20,75	0,087	-84,0	-8,40	0,015	-3,8	-0,38
0,4	0,136	251	25,1	0,071	-100,4	-10,04	0,013	-4,2	-0,42
0,5	0,111	-282	-28,2	0,057	122,0	-12,20	0,01	-6,75	-0,675
0,6	0,09	-310	-31,0	0,045	137,0	-13,70	0,008	8,65	0,865
0,7	0,071	-332	-33,2	0,037	148,0	-14,80	0,0065	10,5	1,05
0,8	0,057	-351	-35,1	0,029	158,0	-15,80	0,005	11,8	-1,18
0,9	0,046	-366	-36,6	0,024	164,0	-16,40	0,004	13,1	-1,31
1,0	0,035	-379	-37,9	0,019	170,5	-17,05	0,003	14,4	-1,44

Продовження табл. 4

Час, г	x/8 = 0,4			x/8 = 0,2			x/8 = 0,0		
	f	σ		f	σ		f	σ	
		Мн/м ²	кг/мм ²		Мн/м ²	кг/мм ²		Мн/м ²	кг/мм ²
0,1	-0,07	19,1	1,91	-0,132	21,2	2,12	-0,146	27,8	2,78
0,2	-0,056	39,0	3,90	-0,106	52,1	5,21	-0,118	72,4	7,24
0,3	-0,046	51,8	5,18	-0,086	77,6	7,76	-0,1	85,2	8,52
0,4	-0,038	62,0	6,20	-0,067	102,0	10,20	-0,08	110,7	11,07
0,5	-0,03	72,2	7,22	-0,053	119,5	11,95	-0,064	131,0	13,10
0,6	-0,025	78,5	7,85	-0,045	130,0	13,00	-0,051	147,7	14,77
0,7	-0,019	86,0	8,60	-0,035	142,5	14,25	-0,04	162,0	16,20
0,8	-0,015	91,3	9,13	-0,028	151,5	15,15	-0,033	170,5	17,05
0,9	-0,012	95,2	9,52	-0,022	159,0	15,9	-0,025	180,7	18,07
1,0	-0,01	97,6	9,76	-0,019	163,0	16,3	-0,021	186,0	18,60

Примітка: функцію f ($\alpha t/S^2$; x/S) визначають по графіку, приведеному на

рис. 10.

З формули (1.19.) виходить, що при $x = \pm S$ на поверхні пластини:

$$\sigma_y^{\Pi} = \sigma_z^{\Pi} = -\frac{\alpha_1 E}{(1-\psi')} \cdot \frac{cS^2}{3\alpha}$$

при $x = 0$, тобто в середині пластини:

$$\sigma_y^C = \sigma_z^C = -\frac{\alpha_1 E}{(1-\psi')} \cdot \frac{cS^2}{6\alpha}$$

в нейтральному перетині, в якому $\sigma_y = \sigma_z = 0$, буде $x_0 / S = 0,578$, коли $(1 - 3x_0^2/S^2) = 0$.

Задача № 3. Даний графік нагріву плити $t = \varphi(\tau)$. Вимагається визначити розподіл напруг по перетину плити у будь-який момент часу якщо на початку нагріву температурний градієнт і температурні напружки відсутні. Відомі товщина сталеві плити $2S$ і фізико-механічні властивості стали: α , α_1 , E , $\psi' = 0,3$. Початкова різниця температур плити $\Delta t_0 = 0$.

Рішення

1. Температурну криву розбивають на прямолінійні ділянки і відзначають на них крапки, відповідні часу нагріву t_1, t_2, t_3 і т.д.

2. В інтервалі даних ділянок знаходять швидкості нагріву $C_1, C_2, C_3 \dots = t/\tau$, град/ч.

3. Обчислюють критерій Фур'є $\alpha t_1/S^2, \alpha t_2/S^2, \alpha t_3/S^2$; і т.д.

4. По графіку рис. 12 визначають значення критерію Фур'є $\Phi(\alpha t/S^2; x/S)$ для кожної крапки кривої, відповідній часу нагріву τ_1, τ_2, τ_3 і т.д.

5. Визначають різницю температур в граничних крапках а, b, с і т.д. на розбитих ділянках заданої кривої по формулі:

$$\Delta t_{\Gamma} = \frac{C_1 S^2}{2\alpha} \quad (1.20.)$$

де Δt_{Γ} — найбільша різниця температур по перетину °С.

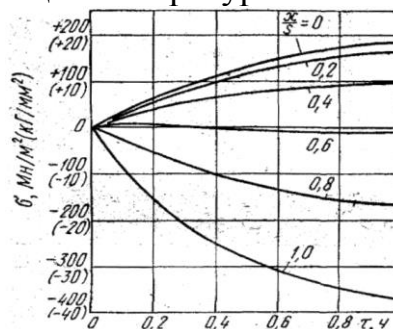


Рисунок 11- Температурні напружки в пластині при лінійному зміні температури поверхні

6. Визначають початкову різницю температур поверхні і середини тіла Δt по формулі:

$$\Delta t = \Delta t_r - 2(\Delta t_r - \Delta t_0)\Phi \quad (1.21.)$$

По умові задачі $\Delta t = 0$.

Таким же методом визначають Δt в інших точках кривої.

7. По графіку мал. 10 визначають функцію f ($\alpha\tau/S^2$; x/S) відповідаючу вибраним точкам перетину, що розглядається, плити, що нагрівається.

8. Визначають напруги σ_z по формулі (1.19.).

9. За отриманими розрахунковими даними будують графік, аналогічний графіку, приведеному на рис. 12. Графік нагріву металу представлений на рис. 13.

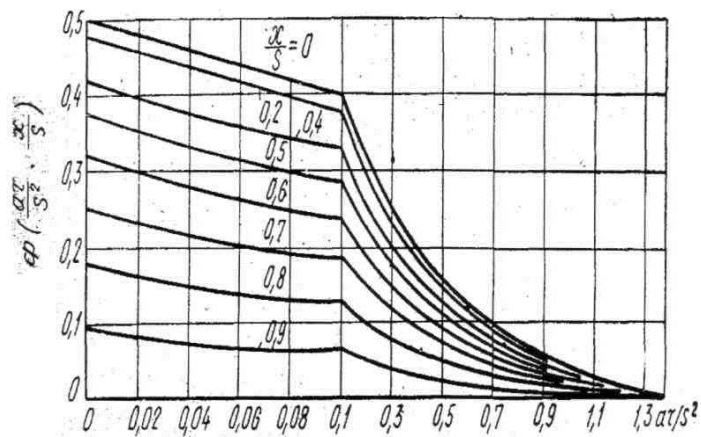


Рисунок 12 - Графік функції $\Phi(\alpha\tau/S^2; x/S)$ для пластин при лінійному зміні температури поверхні

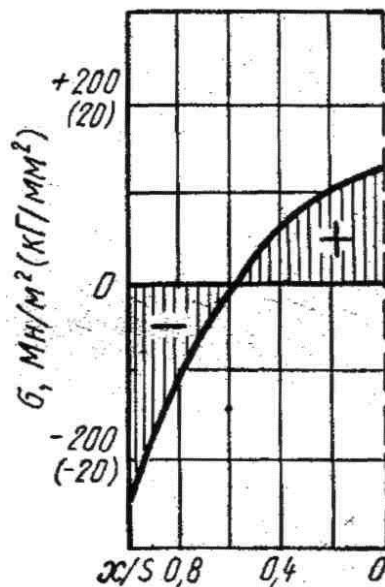


Рисунок 13 - Розподіл температурних напруг по перетину плити

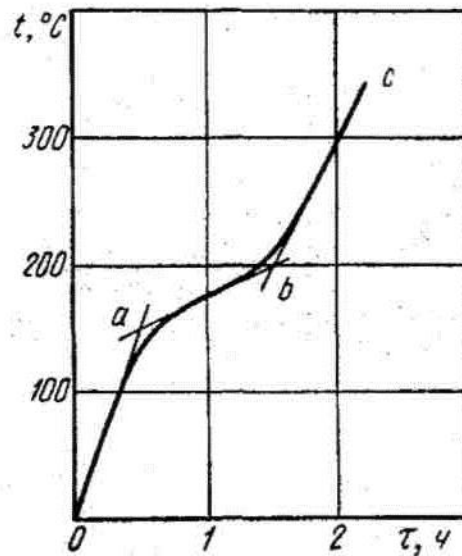


Рисунок 14 - Графік нагріву плити

Напруги в металі при нагріві в печі з постійною температурою

Задача № 4. Побудувати криві зміни температурних напруг на поверхні і в середині сталевій плити завтовшки $2S$ при нагріві її в печі (t_n), рахуючи початкову температуру плити $t_0 = 0^\circ \text{C}$.

Рішення

1. Як і в раніше розглянутих задачах, спочатку відшукуються по довіднику дані фізико-механічних властивостей сталі: α ; E ; ψ' ; λ ; α ; a .
2. Обчислюють критерій Біо $Bi = aS/\lambda$ і Фур'є $F_0 = a\tau/S$. Величиною τ задаються.
3. Відшукують по графіку рис. 15 функцію $f(\alpha\tau/S^2; aS/\lambda)$ при $x/S = 1$ для напруг на поверхні і при $x/S = 0$ для напруг в середині плити. Значення функції $f(\alpha\tau/S^2; x/S)$ при $aS/\lambda = 10$ відшукують на графіку рис. 16.
4. Визначають напругу на поверхні плити по формулі:

$$\sigma_y^{\text{п}} = \sigma_z^{\text{п}} = \frac{\alpha_1 E (t_0 - t_n) f_{\text{п}} (\alpha\tau; cS; x)}{(1 - \psi') S^2 \lambda S} \quad (1.22.)$$

Напруга в середині плити при $x/S = 0$ визначають по формулі (1.22.). Результати розрахунків представляються у вигляді графіка окремо для розтягуючих і для стискуючих напруг.

Задача № 5. Визначити температурні поверхневі і осьові напруги в круглому злитку радіусу K при кінцевій температурі його поверхні t_n ,

початковій температурі циліндра t_0 і температурі печі $t_{печ}$.

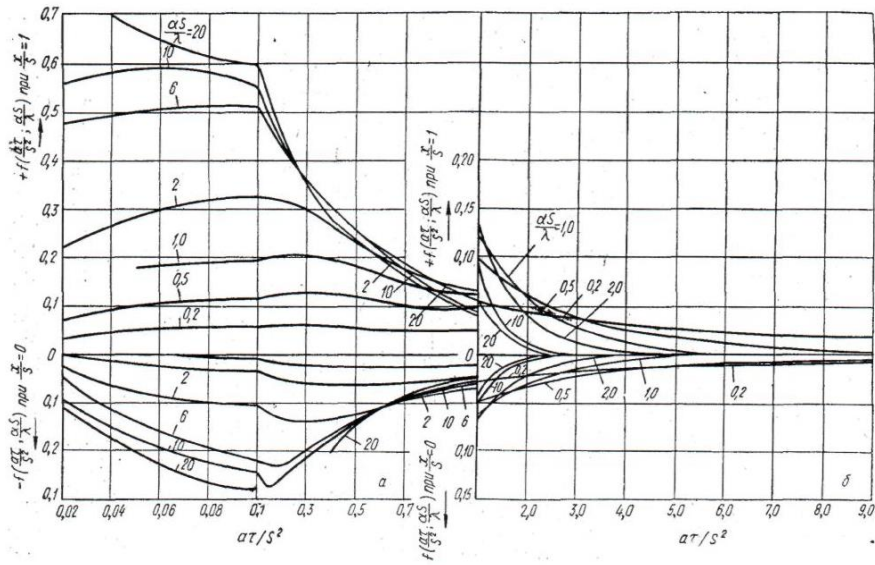


Рисунок 15 - Графік функції $f(\alpha\tau/S^2; aS/\lambda)$ для температурних напруг на поверхні (а) і в середині (б) пластини при постійній температурі печі

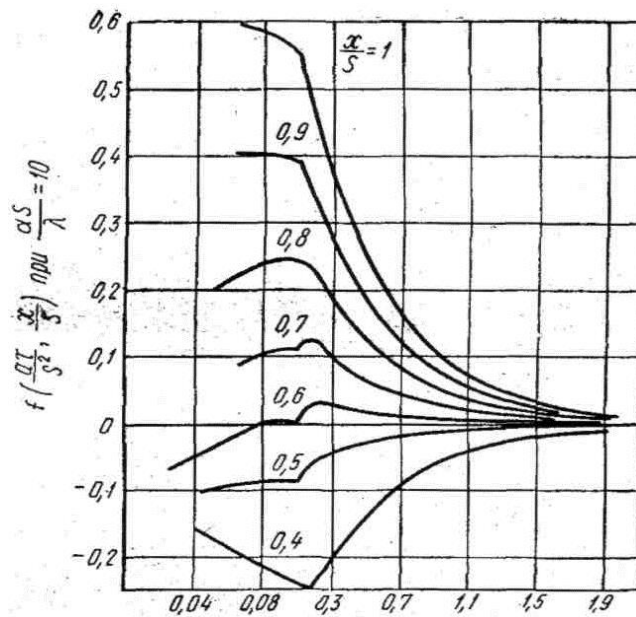


Рисунок 16 - Графік функції $f(\alpha\tau/S^2; x/S)$ для температурних напруг в пластині при постійній температурі в печі та при $aS/\lambda = 10$

Рішення

1. По таблицях приймають значення фізичних параметрів металу: λ , α , a , E , α_1 .
2. Знаходять критерій aR/λ .
3. Визначають відносну температуру поверхні циліндра по формулі:

$$\Phi = \frac{t_{II} - t_{печ}}{t_0 - t_{печ}} \quad (1.23.)$$

4. По значенням aR/λ і Φ знаходять критерій $\alpha\tau/R^2$ (рис. 17).

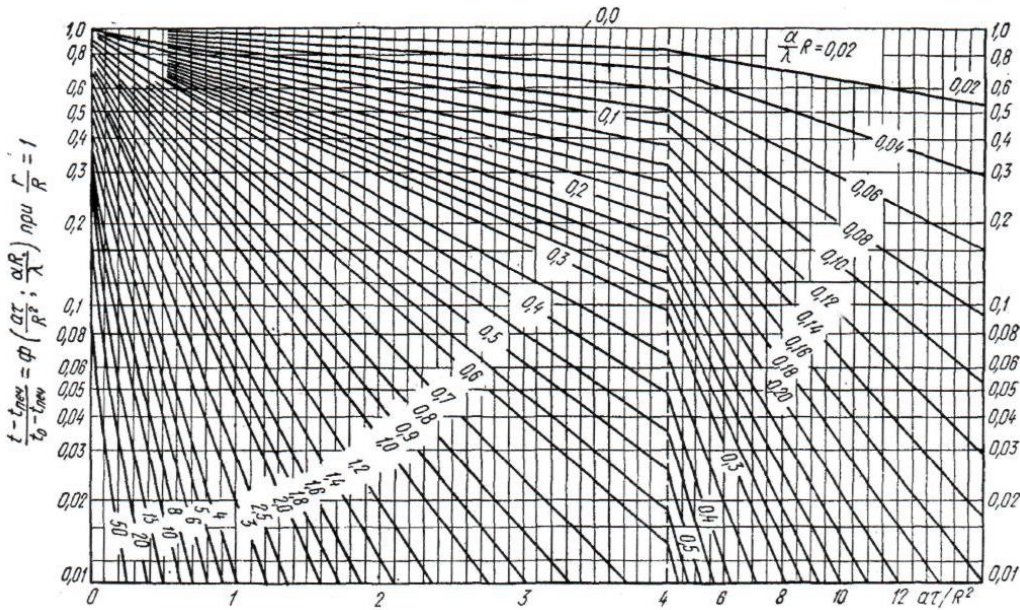


Рисунок 17 - Номограма для визначення температурного критерія $\theta = \Phi(\alpha\tau/R^2, aR/\lambda)$ поверхні циліндра безкінечної довжини

5. З урахуванням значень $\alpha\tau/R^2$ і aR/λ по діаграмах, приведених на: рис. 18—20, відшуковують функції f_r, f_θ і f_z для поверхні і осі циліндра.

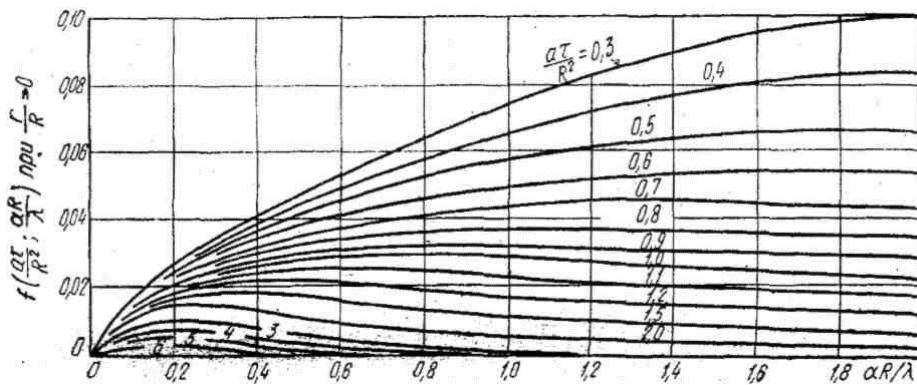


Рисунок 18 - Графік функції $f(\alpha\tau/R^2; aR/\lambda)$ для реальних напруг на осі циліндра при постійній температурі

6. Визначають температурні напруги на поверхні і по осі циліндра по наступних формулах: на поверхні:

радіальні напруги $\sigma_r = 0$;

тангенціальні напруги:

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha_1 E (t_{\text{пч}} - t_0) f_\theta}{(1 - \nu')} \quad (1.24.)$$

осьові напруги:

$$\sigma_z = \frac{\alpha_1 E (t_{\text{пч}} - t_0) f_z}{(1 - \nu')} \quad (1.25.)$$

на осі:

радіальні напруги

$$\sigma_r = \frac{\alpha_1 E (t_{\text{пч}} - t_0) f_r}{(1 - \psi')} \quad (1.26.)$$

тангенціальні напруги

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha_1 E (t_{\text{пч}} - t_0) f_\theta}{(1 - \psi')} \quad (1.27.)$$

осьові напруги

$$\sigma_z = \frac{\alpha_1 E (t_{\text{пч}} - t_0) f_z}{(1 - \psi')} \quad (1.28.)$$

Значення критеріїв визначають по рис. 17—20. По цих же рисунках визначають f_r , f_θ і f_z залежно від критеріїв $\alpha\tau/R^2$ і aR/λ при $r/R = 1$ і $r/R = 0$.

Осьові напруги при інших значеннях r/R визначають по діаграмі рис. 21.

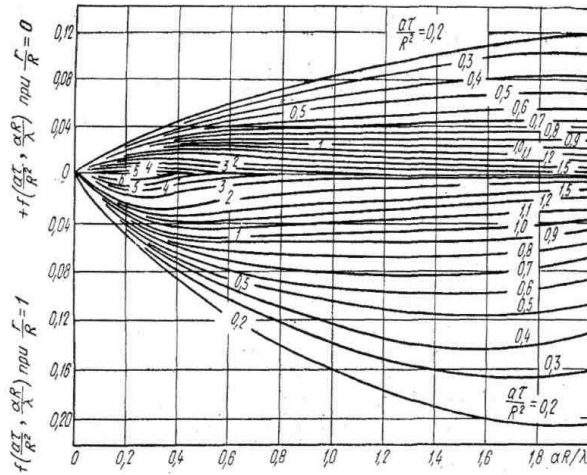


Рисунок 19 - Графік функції $f(\alpha\tau/S^2; aS/\lambda)$ для тангенціальних напругах на поверхні і на осі при постійній температурі печі

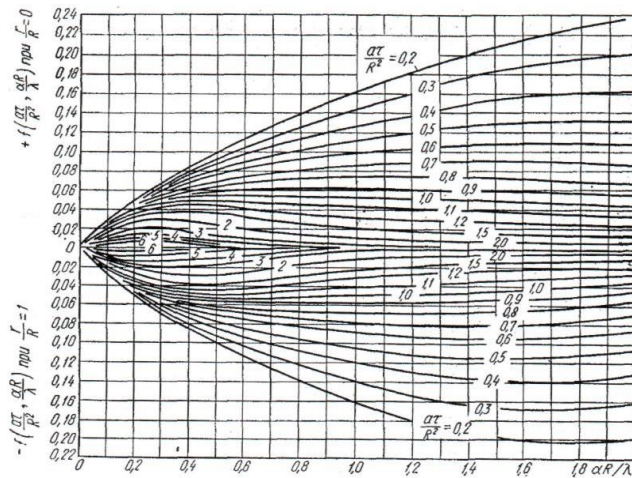


Рисунок 20 - Графік функції $f(\alpha\tau/S^2; aS/\lambda)$ для осьових напружень на поверхні і на осі циліндра при постійній температурі печі

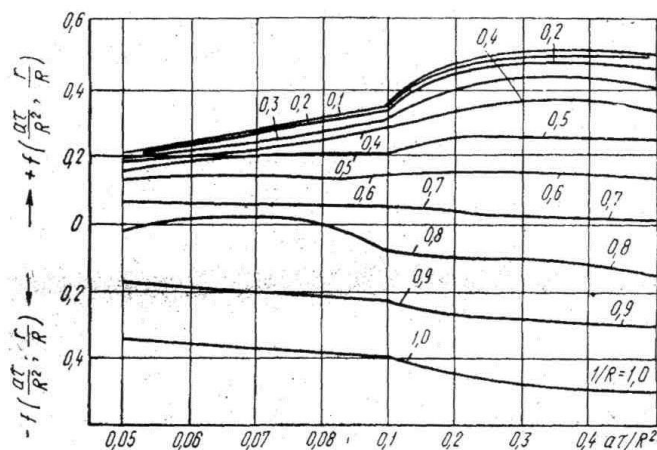


Рисунок 21 - Графік функції $f(\alpha\tau/S^2; aS/\lambda)$ для осьових температурних напруг в циліндрі при постійному тепловому потоку

2. ПРИКЛАДИ РІШЕННЯ ЗАДАЧ

Визначення температури нагріву сталі

Задача № 6. Визначити граничну температуру нагріву злитка доєвтектоїдної вуглецевої сталі 15 наступного хімічного складу %: 0,13 C; 0,25 Si; 0,44 Mn; 0,026 S; 0,018 P; 0,07 Cr; 0,17 Ni. Сталь належить до перлітного класу її критичні точки: $A_{C1} = 735^\circ \text{C}$; $A_{C3} = 863^\circ \text{C}$, $A_{r3} = 840^\circ \text{C}$; $A_{r1} = 685^\circ \text{C}$.

Рішення

По діаграмі Fe—C (див. рис. 2) для сталі заданого хімічного складу температура по лінії солідуса $t_{сол} = 1460^\circ \text{C}$. По формулі (1.1.) початкова гранична температура:

$$t_H = t_{сол} - 200^\circ = 1460 - 200 = 1260^\circ \text{C}$$

Результати механічних випробувань при високих температурах показують, що сталь 15 володіє найвищою пластичністю в інтервалі 1200—1300° C [2].

Задача № 7. Визначити граничну температуру нагріву злитка із сталі У7 наступного хімічного складу %: 0,73 C, 0,27 Si, 0,25 Mn, 0,028 S, 0,015 P, 0,08 Cr, 0,25 Ni. Доєвтектоїдна сталь У7 відноситься до перлітного класу, її критичні точки: $A_{C1} = 730^\circ \text{C}$; $A_{C3} = 770^\circ \text{C}$; $A_{r1} = 700^\circ \text{C}$ (в умовах повільного охолодження).

Рішення

По формулі (1.1.):

$$t_{сол} = 1380^\circ \text{C};$$

$$t_H = t_{сол} - 160^\circ \text{C} = 1380 - 160 = 1220^\circ \text{C}$$

Результати механічних випробувань [12] показали, що сталь У7 володіє хорошою пластичністю в інтервалі температур 700—1250° С.

Задача № 8. Визначити граничну температуру нагріву злитка із сталі У12 наступного хімічного складу %: 1,17 С; 0,26 Si; 0,20 Mn; 0,020 S; 0,010 P; 0,19 Ni.

Заевтектоїдна сталь У12 відноситься до перлітного класу, її критичні крапки: $A_{C1} = 730^{\circ} \text{C}$; $A_{C3} = 820^{\circ} \text{C}$; $A_{\Gamma} = 700^{\circ} \text{C}$ (в умовах повільного охолодження).

Рішення

По формулі (1.1.):

$$t_{\text{сол}} = 1330^{\circ}\text{C};$$
$$t_{\text{н}} = t_{\text{сол}} - 130^{\circ}\text{C} = 1330 - 130 = 1200^{\circ}\text{C}$$

На підставі результатів механічних випробуванні [2] можна зробити висновок, що сталь У12 володіє хорошою пластичністю в інтервалі температур 900—1250° С.

Задача № 9. Визначити граничну температуру нагріву злитка із сталі 1Х21Н5Т.

Рішення

Ця сталь двофазна, неіржавіюча ферито - аустенітного класу, яка, згідно рис. 22, має до температури 840° С структуру $\alpha + \gamma + \sigma$, а в інтервалі температур 840— 1200° С зберігає двофазну структуру $\alpha + \gamma$ в інтервалі 1200— 1420° С сплав стає однофазним α . З 1420° С і вище сплав переходить в рідку фазу. За даними роботи [28], сталь 1Х21Н5Т має підвищені параметри пластичності в інтервалі температур 900—1200° С, а саме: $\delta = 95 \div 143\%$ і $\psi = 91,0 \div 78\%$.

Пластичність даної сталі залежить від співвідношення змісту фериту і аустеніту. Максимальну пластичність сталь має при $\alpha/\gamma = 4$ ($\alpha = 80\%$ у = 20%; див. рис. 23 і 24).

Отже, температура нагріву злитків повинна бути не нижчим 1200 і не вище 1300°С.

Більш високу температуру нагріву зливка прийняти не можна, оскільки з підвищенням температури нагріву спостерігається зростання зерен фериту, різко знижуються механічні властивості сталі, вона стає крихкою (Рис. 25).

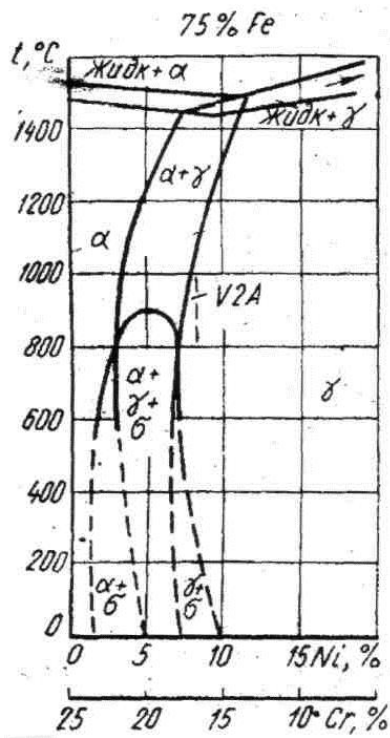


Рисунок 22 - Діаграма стану Fe - Cr - Ni

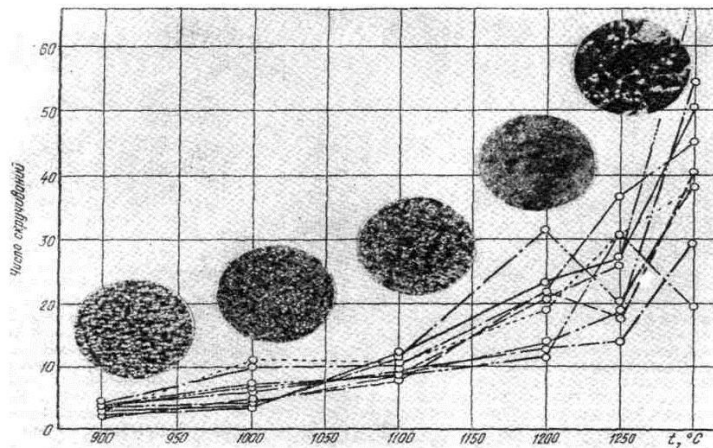


Рисунок 23 - Вплив температури на число скручувань та мікроструктуру зразків різних плавок при крутіння (по Шину Р.Г.)

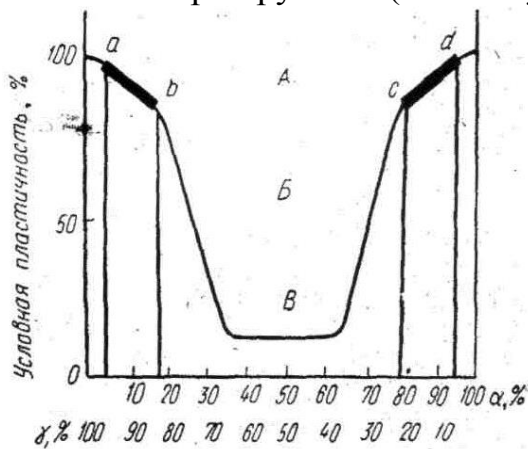


Рисунок 24 - Змін пластичних властивостей сталі в залежності від відношення аустеніту у і фериту а в металі (за даними А.А. Бабакова): ab -

структурна область сталей аустеніто - феритного класу при високих температурах; cd - структурна область двофазних сталей ферито – аустенітного класу при високих температурах; А - область задовільної пластичності; Б - область зниженої пластичності; В - область поганої пластичності.

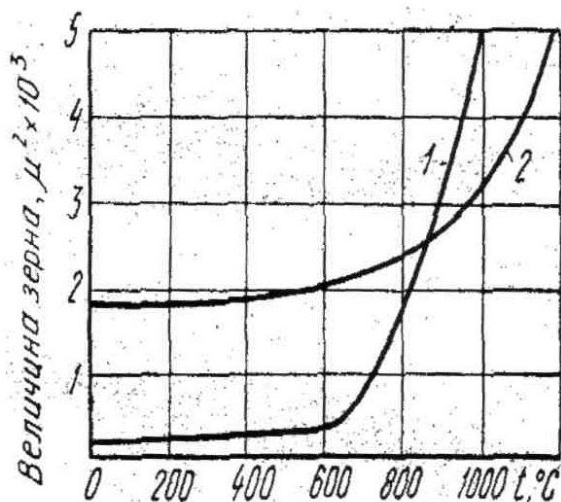


Рисунок 25 - Змін величини зерна феритних (1) і аустенітних (2) сталей в залежності від температури

Задача № 10. Заготовку круглого перетину діаметром 200 мм з м'якої вуглецевої сталі нагрівають в печі при температурі газу $t_r = 1250^\circ \text{C}$. Початкова температура металу $t_0 = 0^\circ \text{C}$.

Визначити температуру поверхні і середини заготівки, якщо метал в печі нагрівають в продовж $\tau = 30$ хв.

Рішення

Фізичні параметри сталі :

$$\lambda = 51,17 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)} \times [44 \text{ ккал/(м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{град)}];$$

$$a = 0,0446 \text{ м}^2/\text{ч};$$

$$\alpha = 249,4 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{град)} [215 \text{ ккал/(м}\cdot\text{ч}\cdot\text{град)}];$$

$$\frac{\alpha S}{2\lambda} = \frac{249,4 \cdot 0,2}{2 \cdot 51,17} = \frac{215 \cdot 0,2}{2 \cdot 44} \approx 0,5$$

$$\frac{4a\tau}{S^2} = \frac{4 \cdot 0,0446 \cdot 0,5}{0,2^2} = 2,23.$$

Із мал. 5 по значенням $aS/2\lambda$, і $\alpha\tau/S^2$ знаходимо, що $\frac{t_{II} - t_r}{t_0 - t_r} = 0,15$.

Тоді

$$\frac{t_{II} - 1250}{0 - 1250} = 0,15,$$

звідки

$$t_n = 0,15(0-1250) + 1250 = 1080^\circ\text{C}.$$

Із мал. 6 знаходимо, що

$$\frac{t_c - t_r}{t_0 - t_r} = 0,20.$$

Тоді

$$\frac{t_c - 1250}{0 - 1250} = 0,20 \text{ або } t_c = 0,20(0 - 1250) + 1250 = 1000^\circ\text{C}$$

Отже, через 30 хв. температура на поверхні заготовки буде $t_n = 1080^\circ\text{C}$, а в центрі $t_c = 1000^\circ\text{C}$. Разність температур між поверхнею і центром буде $\Delta t = 1080 - 1000^\circ\text{C} = 80^\circ\text{C}$.

Приклади рішення задач за визначенням тривалості нагріву сталі

Задача № 11[4]. Визначити тривалість нагріву зливків розмірами 680x680x2000 мм із сталі 20 до температури поверхні 1280° С. Початкова температура зливка 20° С.

Умови нагріву в рекуперативних колодязях наступні:

1. Нагрів двоступеневий: перший період — при постійній тепловій потужності; другий період — при постійній температурі печі.

2. Середні теплові потоки і зміни тепловмісту металу : в перший період $q_1 = 93,02 \text{ кВт/м}^2$ (80000 ккал/м²·ч) і $\Delta i = 582,12 \text{ кДж/кг}$ (138,6 ккал/кг); в другий період $q_2 = 37,82 \text{ кВт/м}^2$ (32600 ккал/м²·ч) і $\Delta i_2 = 292,32 \text{ кДж/кг}$ (69,6 ккал/кг).

Рішення

Квадратний перетин зливка замінюють круглим рівновеликій площі. Радіус круга в цьому випадку рівний:

$$R = \frac{\sqrt{0,68 \cdot 0,68}}{\pi} = 0,384 \text{ м}$$

Загальну тривалість нагріву зливка визначають по формулі (1.3.):

$$\tau = \frac{R_\rho (\Delta i_1 + \Delta i_2)}{2q_1 q_2}$$

де $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$.

В одиницях системи СІ (1 дж = $2,78 \cdot 10^{-4}$ вт·ч):

$$\tau = \frac{0,384 \cdot 7800 (582120 \cdot 2,78 \cdot 10^{-4} + 292320 \cdot 2,78 \cdot 10^{-4})}{2 \cdot 93020 \cdot 37820} = 5,79 \text{ ч.}$$

Задача № 12. В нагрівальних колодязях нагрівають зливков сталі з 0,7% С. Розміри зливка 680x680x2000 мм. Початкова температура зливка 20° С; $\rho = 7750 \text{ кг/м}^3$.

Визначити тривалість нагріву зливка (по періодах). Нагрів триступиневий.

Перший період — з обмеженою швидкістю до 500° С в середині; другий період — при постійному зростанні теплової потужності; третій період — при постійній температурі печі. Визначити час нагріву зливка до кінцевої температури поверхні $t_{п.к} = 1250^\circ \text{ С}$.

Рішення

Повну тривалість нагріву зливка визначають по формулі (1.4.), в якій $k = 1$ для квадратного перетину:

Відомо, що: $\Delta i_1 = 352,00 \text{ кДж/кг}$ (83,9 ккал/кг); $\Delta i_2 = 223,00 \text{ кДж/кг}$ (53,2 ккал/кг); $\Delta i_3 = 261,4 \text{ кДж/кг}$ (62,4 ккал/кг); $q_1 = 36,19 \text{ кВт/м}^2$ (31 200 ккал/м²-ч); $q_2 = 48,72 \text{ кВт/м}^2$ (42 000 ккал/м²-ч); $q_3 = 26,91 \text{ кВт/м}^2$ (23 200 ккал/м²-ч).

Тоді

$$\tau = \frac{0,384 \cdot 7750 (352000 \cdot 2,78 \cdot 10^{-4})}{2 \cdot 36190} + \frac{223000 \cdot 2,78 \cdot 10^{-4}}{48720} + \frac{261400 \cdot 2,78 \cdot 10^{-4}}{26900} = 9,8 \text{ ч}$$

По формулах (1.4.) визначаємо: $\tau_1 = 3,97 \text{ ч}$; $\tau_2 = 1,89 \text{ ч}$; $\tau_3 = 4 \text{ ч}$, тоді

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = 3,97 + 1,89 + 4,0 = 9,86 \text{ ч.}$$

Задача № 13 [4]. Визначити тривалість нагріву зливка вуглецевої сталі із змістом 0,3% С при гарячому посаді в осередки рекуперативних колодязів.

Розміри зливка $\frac{690 \times 600}{595 \times 505} \times 1800 \text{ мм}$.

Початкова температура поверхні зливка $t_n = 850^\circ \text{ С}$, кінцева $t_{к.п.}^0 = 1250^\circ \text{ С}$ при перепаді $\Delta t = 50^\circ \text{ С}$. Температура повітря $t_B = 20^\circ \text{ С}$.

При рішенні приймають наступні кінцеві результати теплотехнічних розрахунків, виконаних Н. Ю. Тайцем стосовно умов даної задачі [15]:

1) тепловий потік охолодження $q_0 = 86,65 \text{ кВт/м}^2$ (74 700 ккал/м² • ч)

$$q_0 = \alpha_0 (t_n - t_B) = \frac{90(850 - 20)}{860} = 86,65 \text{ кВт/м}^2 \text{ (74700 ккал/м}^2\text{-ч)}$$

де α_0 — коефіцієнт тепловіддачі охолодження знаходиться по графіку рис. 26;

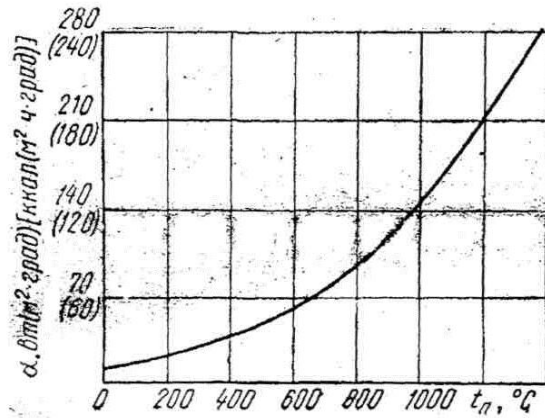


Рисунок : 26 - Змін коефіцієнта тепловіддачі при охолодженні тіла на повітрі

- 2) тепловий потік першого періоду нагріву $q_1 = 63,8 \text{ кВт/м}^2$ ($5500 \text{ ккал/м}^2\text{-ч}$);
- 3) тепловий потік другого періоду $q_2 = 12,6 \text{ кВт/м}^2$ ($10800 \text{ ккал/м}^2\text{-ч}$);
- 4) початкова температура середини зливка $t_c = 1200^\circ \text{C}$;
- 5) середня температура на початку посадки $t_H = 1025^\circ \text{C}$;
- 6) температура поверхні зливка в першому періоді $t_{n1} = 1115^\circ \text{C}$.

Рішення

1. Розрахунковий радіус зливка:

$$R = \frac{\sqrt{0,69 \cdot 0,60 + 0,595 \cdot 0,505}}{2\pi} = 0,338 \text{ м}$$

2. Тривалість першого періоду нагріву зливка:

$$\text{а) } \frac{q_1}{q_2} = \frac{63,8}{86,65} = 0,735;$$

$$\text{б) } \frac{(t_H - t_c)2\lambda}{q_0 R} = \frac{(1388 - 1473) \cdot 41,7}{86,65 \cdot 1000 \cdot 0,338} = -\frac{7089}{29287} = 0,244;$$

де $\lambda = 41,7 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$ ($36,3 \text{ ккал/м}\cdot\text{ч}\cdot^\circ\text{C}$) для вуглецевої сталі при 1000°C ;

в) з рис. 27 за отриманими даними визначаємо:

$$\frac{\alpha \tau_1}{R^2} = 0,04,$$

тоді

$$\tau_1 = \frac{0.04R^2}{a} = \frac{0.04 * 0.338^2}{0.028} = 0.163 \text{ г,}$$

де $a = 0.028 \text{ м}^2/\text{г}$ — коефіцієнт температуропроводності.

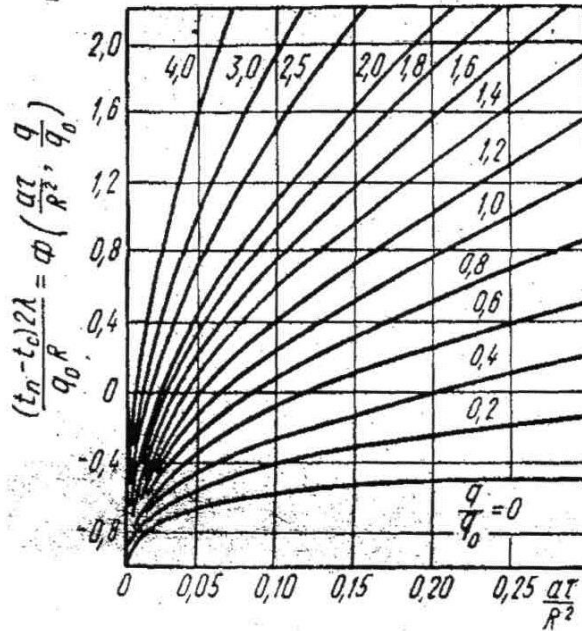


Рисунок 27 - Відносна температура $(t_n^q - t_{cp}) 2\lambda/q_0R = \Phi(\alpha\tau/R^2; q/q_0)$ поверхні циліндра при постійному тепловому потоці q при наявності температурного градієнту в початковий момент

3. Температуру осі зливка t_{oc} за даними q_1 / q_0 і $\alpha\tau / S^2$ визначаємо з рис. 28: $\Phi = -0.2$, звідки:

$$t_{o.c.} = t_c - \Phi \frac{q_0 R}{2\lambda} = 1200 - 0.2 \frac{86650 * 0.338}{2 * 41.7} = 1130^\circ\text{C}$$

4. Середня температура зливка:

$$t_1 = t_H + \frac{2q_1\tau_1}{R_p c_p} = 1025 + \frac{2 * 63800 * 0.163}{0.338 * 7500 * 695 * 2.78 * 10^{-4}} = 1067^\circ\text{C}$$

де $C_p = 695 \text{ дж/кг}\cdot\text{град}$ (167 кал/кг·град).

5. Тепловміст i_1 знаходять по табл. 5; при $t_1 = 1067^\circ \text{C}$ $i_1 = 745.8 \text{ кДж/кг}$ (178 ккал/кг).

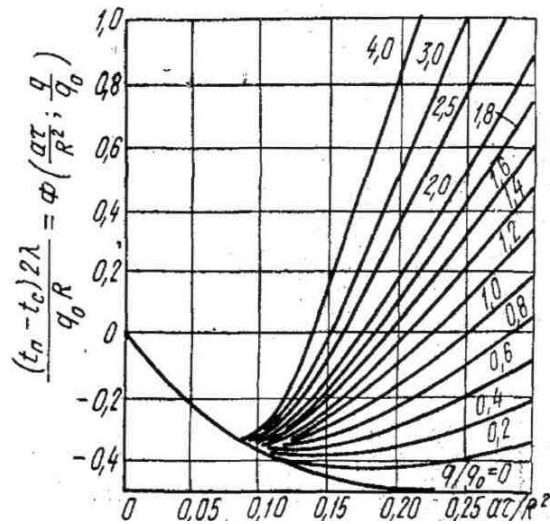


Рисунок 28 - Відносна температура $(t_{cp} - t_0) \times 2\lambda/q_0R = \Phi(\alpha\tau/R^2; q/q_0)$ по осі циліндра при постійному тепловому потоці та при наявності температурного градієнту в початковий момент

6. $\Delta i_2 = i_2 - i_1 = 860,19 - 745,8 - 114,39$ кДж/кг (27,3 ккал/кг), де i_2 знаходиться з табл. 5 по середній температурі другого періоду нагріву зливків, рівній

$$t_2 = t_{п2} - \frac{1}{2} \Delta t_2 = 1250 - 25 = 1225^\circ\text{C}.$$

7. Середній тепловий потік:

$$q_2 = \frac{q_1 - q_2}{\ln q_1 / q_2} = \frac{63,8 - 12,6}{\ln 63,8 / 12,6} = 31,0 \text{ кВт/м}^2 \text{ (27000 ккал/ м}^2 \cdot \text{ч)}$$

8. Тривалість нагріву за другий період

$$\tau_2 = \frac{\Delta i_2 R \rho}{2 q_2} = \frac{114390 * 2,78 * 10^{-4} * 0,338 * 7500}{2 * 31000} = 1,28 \text{ ч}$$

9. Загальна тривалість нагріву

$$\tau = 0,163 + 1,28 = 1,443 \text{ ч.}$$

Задача № 14 [4]. Визначити тривалість нагріву заготовки із сталі Ст.3 квадратного перетину розмірами 140 x 140 мм, завдовжки 1,45 м до кінцевої температури поверхні заготовки $t_{к.п} = 1250^\circ\text{C}$ в методичній дворядній печі, що працює по двозонному температурному режиму. Продуктивність печі $G = 55$ т/ч; початкова температура поверхні заготовки $t_{п} = 0^\circ\text{C}$, кінцевий перепад температур по перетину заготовки $\Delta t 40^\circ\text{C}$.

Рішення

1. Загальний час нагріву

$$\tau_{заг} = \frac{F_{акт} 2S\rho}{G} = \frac{78,5 * 0,14 * 7800}{55000} = 1,56 \text{ ч.}$$

де $F_{акт}$ - площа активного череня печі, рівна:

$$F_{акт} = \frac{G}{H} = \frac{55000}{700} = 78,5 \text{ м}^2$$

$2S = 140$ мм — товщина заготовки;

$H = 700$ кг/м²·ч — напруженість активного череня печі.

2. Час нагріву металу в томильній печі з монолітним черенем

$$\tau_3 = \frac{L_{св} 2Sl\rho n}{G} = \frac{4,5 * 0,14 * 1,45 * 7800 * 2}{55000} = 0,26$$

де $n = 2$ — число заготовок по ширині печі.

3. Час нагріву металу в зварювальній зоні з двостороннім нагрівом:

$$\tau_2 = \frac{\Delta i_2 S \rho}{k_1 q_2} = \frac{470000 * 2,78 * 10^{-4} * 0,07 * 7800}{1 * 92600} = 0,77 \text{ ч.}$$

Розрахунок зміни тепловмісту Δi_2 і середнього теплового потоку q_2 є приведений в роботі Н. Ю. Тайца і Ю. Н. Розенгарта [6].

4. Час нагріву в методичній зоні

$$\tau_1 = \tau - (\tau_2 + \tau_3) = 1,56 - (0,26 + 0,77) = 0,535 \text{ ч.}$$

Задача № 15 [4]. Визначити тривалість нагріву круглих зливків діаметром 412 мм і заввишки 1800 мм із сталі марки D до $t_{п.к.} = 1280^\circ \text{ C}$ за наступних умов: початкова температура металу $t_n = 20^\circ \text{ C}$, кінцева різниця температур $\Delta t_k = 60^\circ \text{ C}$ продуктивність печі $G = 35$ т/ч.

Зміни тепловмісту: в методичній зоні $\Delta i_1 = 388,92$ кДж/кг (92,6 ккал/ч), в зварювальній зоні $\Delta i_2 = 491,4$ кДж/кг (117 ккал/ч).

Середні теплові потоки: в методичній зоні $q_1 = 66,81$ кВт/м (57 600 ккал/м²·ч) в зварювальній зоні $q_2 = 48,95$ кВт/м (42 200 ккал/м²·ч). Значення Δi_1 , Δi_2 , q_1 і q_2 є прийнятий за даними Н. Ю. Тайца [4].

Тепловміст чистого заліза та вуглецевих сталей, кДж/кг (ккал/кг) [4]

Температура, °С	Чисте залізо	Сталь з вмістом вуглецю, %										
		0,090	0,234	0,30	0,510	0,610	0,795	0,920	0,994	1,235	1,410	1,575
100	11,1	46,5 (11,1)	46,5 (11,1)	47 (11,2)	47,4 (11,3)	47,8 (11,4)	48,2 (11,5)	50,3 (12,0)	48,6 (11,6)	49,5 (11,8)	48,6 (11,6)	50,2 (12,0)
200	23,4	95,5 (22,8)	95,8 (22,9)	95,8 (22,9)	95,8 (22,9)	96,3 (23,0)	96,7 (23,1)	100 (24,0)	99 (23,7)	100 (23,9)	100 (23,9)	101 (24,1)
300	36,6	148 (35,4)	150 (35,8)	151 (36,0)	152 (36,2)	153 (36,5)	155 (36,9)	156 (37,2)	155 (36,0)	155 (37,0)	155 (36,9)	157 (37,5)
400	57,2	205 (49,0)	206 (49,2)	206 (49,3)	209 (49,9)	210 (50,1)	210 (50,2)	214 (51,0)	211 (50,4)	213 (50,9)	211 (50,3)	214 (51,1)
500	67,0	265 (63,4)	266 (63,7)	267 (63,9)	268 (64,1)	269 (64,3)	271 (64,8)	275 (65,9)	272 (65,0)	274 (65,5)	272 (65,0)	277 (66,1)
600	85,2	339 (81,0)	340 (81,2)	341 (81,4)	343 (82,0)	344 (82,1)	344 (82,3)	349 (83,5)	346 (82,7)	347 (83,0)	345 (82,5)	351 (83,9)
700	100,07	419 (100,1)	420 (100,2)	421 (100,5)	423 (101,0)	424 (101,2)	425 (101,4)	427 (102,1)	423 (101,0)	428 (102,2)	426 (101,6)	431 (103,0)
800	120,62	531 (127,0)	543 (129,6)	550 (131,5)	546 (130,8)	542 (129,5)	550 (131,4)	550 (131,4)	543 (130,0)	547 (131,0)	543 (130,0)	554 (132,3)
900	139,50	628 (150,3)	630 (150,8)	627 (150,0)	620 (148,1)	618 (147,3)	610 (145,9)	603 (144,0)	604 (144,5)	603 (144,0)	605 (144,7)	612 (146,6)
1000	161,27	705 (168,3)	700 (167,6)	698 (166,9)	688 (164,6)	686 (164,0)	678 (162,2)	654 (156,1)	670 (160,2)	660 (157,9)	673 (160,8)	669 (160,0)
1100	177,75	780 (186,5)	772 (184,5)	767 (183,5)	760 (181,7)	756 (180,9)	750 (179,0)	724 (173,1)	740 (177,0)	728 (174,9)	744 (177,9)	720 (172,0)
1200	194,77	850 (203,1)	842 (201,7)	840 (201,0)	835 (198,6)	832 (198,0)	778 (186,1)	790 (189,0)	804 (192,1)	795 (190,0)	813 (194,2)	783 (187,0)
1250	-	885 (211,5)	878 (210,2)	875 (209,6)	867 (207,5)	864 (206,9)	855 (204,5)	824 (197,0)	840 (201,0)	833 (199,0)	848 (202,9)	816 (195,3)

Рішення

1. Тривалість нагріву в методичній зоні при односторонньому нагріві

$$\tau_1 = \frac{\Delta i_1 2R\rho}{k_1 q_1} = \frac{388920 * 2,78 * 10^{-4} * 2 * 0,206 * 7500}{2 * 66810} = 2,5 \text{ ч,}$$

2. Тривалість нагріву в зварювальній зоні

$$\tau_2 = \frac{\Delta i_2 2R\mu\rho}{k_1 q_2} = \frac{491400 * 2,78 * 10^{-4} * 2 * 0,206 * 7500}{2 * 48950} = 3,2 \text{ ч,}$$

де $\mu = 0,75$ коефіцієнт несиметричної нагріву.

3. Загальна тривалість нагріву

$$\tau_{\text{заг}} = \tau_1 + \tau_2 = 2,48 + 3,22 = 5,70 \text{ ч.}$$

4. Питома тривалість нагріву

$$t = \frac{60\tau_{\text{заг}}}{2R} = \frac{5,70 * 60}{2 * 20,6} = 8,3 \text{ хв/см.}$$

Задача № 16 [4]. Визначити тривалість нагріву в кільцевій печі заготовки діаметром $d = 250$ мм, завдовжки $5,0$ м із сталі марки Д до $t_{\text{п.к.}} = 1250^\circ \text{C}$ при $\Delta t_{\text{к}} = 30^\circ \text{C}$, виходячи з таких даних $\Delta i_1 = 505,68$ кДж/кг (120,4 ккал/кг); $\Delta i_2 = 36372$ кДж/кг (86,6 ккал/кг); $q_1 = 51$ кВт/м² (44 000 ккал/м²-г); $q_2 = 49,3$ кВт/м² (42 500 ккал/м²); $\rho = 7800$ кг/м³.

Рішення

1. Час нагріву в методичній зоні

$$\tau_1 = \frac{\Delta i_1 1,1R\rho}{k_1 q_1} = \frac{505680 * 1,1 * 0,125 * 2,78 * 10^{-4} * 7800}{2 * 51000} = 1,78 \text{ г}$$

2. Тривалість нагріву в зварювальній зоні

$$\tau_2 = \frac{\Delta i_{\text{СВАР}} 1,1R\rho}{k_1 q_2} = \frac{363720 * 2,78 * 10^{-4} * 1,1 * 0,125 * 7800}{2 * 48300} = 1,1 \text{ г}$$

де $R_{\text{РАСЧ}} = 2\mu R = 2 * 0,54R \approx 1,1R$ - розрахунковий радіус з урахуванням коефіцієнта несиметричності нагріву $\mu = 0,54$ (за даними Н. Ю. Тайца).

3. Повна тривалість нагріву

$$\tau = 1,47 + 1,1 = 2,57 \text{ ч.}$$

4. Питома тривалість нагріву

$$z = \frac{2,57 \cdot 60}{25} = 6,17 \text{ хв/см}$$

Задача №17 [5]. Метал круглого перетину діаметром 200 мм з м'якої вуглецевої сталі знаходяться в печі з температурою t_n — 1250° С. Визначити, скільки буде потрібно часу, щоб поверхня заготовки нагрілася до 1000° С. Початкова температура металу 0° С.

Рішення

(по методиці Л. М. Марієнбаха).

1. Знаходять фізичні параметри, приведені в табл. 6.

Таблиця 6

Фізичні параметри

t, °C	λ		Cp		P, кг/м ³	$a = \frac{\lambda}{c_p P}$, м ² ч
	вт/м·град	(ккал м·г·град)	кДжк·град	ккал к·град		
0	60,48	52	0,46	0,110	7850	0,0596
1000	41,87	36	0,68	0,163	7530	0,0297
Середня		44	-	-	-	0,0446

2. Коефіцієнт теплопередачі визначають по емпіричній формулі Шака з поправкою Хейлінгенштедта:

$$a = 50 + 0,3 (t_r - 700^\circ\text{C}) = 50 + 0,3 (1250^\circ\text{C} - 700^\circ\text{C}) = 250,1 \text{ вт/м}^2\text{град}$$

$$(215 \text{ ккал/м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{град}).$$

3. Критерій:

$$\frac{aS}{2\lambda} = \frac{250,1 \cdot 0,2}{2 \cdot 51,18} = 0,5$$

$$\frac{t_{II} - t_r}{t_0 - t_r} = \frac{1000 - 1250}{0 - 1250} = 0,2$$

4. По графіку Шака (див. мал. 5) знаходять, що точка перетину осей (0,50; 0,2) потрапляє на криву $4a\tau/S^2 = 2$.

5. З рівняння

$$\frac{4a\tau}{S^2} = \frac{4 \cdot 0,0446\tau}{0,2^2} = 2$$

знаходять, що $\tau = 0,45 \text{ ч} = 27 \text{ хв.}$, звідки

$$z = 27/20 = 1,35 \text{ хв./см.}$$

Таким чином через 27 хв. поверхня заготовки нагрівається до 1000°C .

Задача №18 [6]. Визначити тривалість нагріву вуглецевої заготовки квадратного перетину розмірами $120 \times 120 \times 1350 \text{ мм}$ до температури поверхні металу $t_{\text{пов}} = 1250^\circ \text{C}$ за наступними даними: піч дворядна; активна довжина печі $l_{\text{акт}} = 26,4 \text{ м}$; довжина підігрівуючої камери $l_{\text{під}} = 13,8 \text{ м}$; довжина зварювальної камери $l_{\text{св}} = 6,8 \text{ м}$; довжина томильної камери $l_{\text{том}} = 5,8 \text{ м}$; продуктивність печі $G = 36\,500 \text{ кг/ч}$.

Рішення

(по методиці М.М. Іцковича).

1. Одноразове завантаження печі

$$G_{\text{піч}} = 21_{\text{заг}} \cdot \rho \cdot l_{\text{акт}} = 2 \cdot 1,35 \cdot 0,12 \cdot 7800 \cdot 26,4 = 67000 \text{ кг.}$$

2. При $G = 36\,500 \text{ кг/ч}$ час нагріву складе

$$\tau = \frac{G_{\text{піч}}}{G} = \frac{67000}{36500} = 1,85 \text{ г}$$

3. Тривалість нагріву металу в кожній зоні печі рівна:

$$\tau_{\text{ПОД}} = \tau \frac{l_{\text{ПОД}}}{l_{\text{АКТ}}} = 1,85 \frac{13,8}{26,4} = 0,965 \text{ г}$$

$$\tau_{\text{СВАР}} = \tau \frac{l_{\text{СВАР}}}{l_{\text{АКТ}}} = 1,85 \frac{6,8}{26,2} = 0,475 \text{ г}$$

$$\tau_{\text{ТОМ}} = \tau \frac{l_{\text{ТОМ}}}{l_{\text{АКТ}}} = 1,85 \frac{5,8}{26,4} = 0,410 \text{ г}$$

$$\tau = \tau_{\text{ПОД}} + \tau_{\text{св}} + \tau_{\text{ТОМ}} = 0,965 + 0,475 + 0,410 = 1,85 \text{ г.}$$

4. Питома тривалість або швидкість нагріву

$$z = \frac{1,85 \cdot 60}{25} = 9,25 \text{ хв./см.}$$

Задача № 19 [6]. За умов нагріву, приведених в задачі № 18, визначити тривалість нагріву вуглецевої заготовки квадратного перетину розмірами $120 \times 120 \times 1350 \text{ мм}$ з урахуванням перерахованих нижче даних.

Приріст тепловмісту металу: в підігрівуючій камері $\Delta i_{\text{ГОД}} = 327,6 \text{ кДж/кг}$ (78 ккал/кг); в зварювальній камері $\Delta i_{\text{свар}} = 424,2 \text{ кДж/кг}$ (101 ккал/кг); в томильній

камері $\Delta i_{\text{ТОМ}} = 71,4$ кДж/кг (17 ккал/кг). Температура газів $T_{\text{УХОД}}$, що йдуть = 800°C . Різниця температур по перетину заготовки: в підігрівальній зоні $\Delta i_1 = 78^\circ \text{C}$; в зварювальній зоні $\Delta i_2 = 170^\circ \text{C}$; в томильній зоні $\Delta i_3 = 27^\circ \text{C}$.

Визначимо тривалість нагріву заготовки в кожній зоні печі по формулах (1.7.):

$$\begin{aligned}\tau_{\text{ПОД}} &= \frac{287 \Delta i_{\text{ПОД}} S \sqrt{S}}{(T_{\text{УХОД}}/100)^2 \sqrt{\Delta t_1}} = \\ &= \frac{287 \cdot 327600 \cdot 2,78 \cdot 10^{-4} \cdot 0,12 \sqrt{0,12}}{(10,73)^2 \sqrt{78}} = 0,93 \\ \tau_{\text{СВАР}} &= \frac{35,6 \Delta i_{\text{СВАР}} S^2}{\sqrt{\Delta t_1 \cdot \Delta t_2}} = \frac{35,6 \cdot 424200 \cdot 2,78 \cdot 10^{-4} \cdot 0,12^2}{\sqrt{78 \cdot 170}} = 0,46 \text{ ч} \\ \tau_{\text{СВАР}} &= \frac{112,5 \Delta i_{\text{ТОМ}} S^2}{\sqrt{\Delta t_2 \cdot \Delta t_3}} = \frac{112,5 \cdot 71400 \cdot 2,78 \cdot 10^{-4} \cdot 0,12^2}{\sqrt{170 \cdot 27}} = 0,46 \text{ ч}\end{aligned}$$

Загальна тривалість нагріву $\tau = 0,93 + 0,46 + 0,41 = 1,80$ ч, тобто добре узгоджується з величиною, отриманою в задачі № 18.

Метод визначення Δi і Δt достатньо детально є висловлений в роботі [6].

Визначення часу нагріву по напівемпіричних формулах

Задача № 20. Визначити тривалість нагріву в нагрівальних колодязях зливка вуглецевої сталі вмістом $C = 0,3\%$ і розмірами: $\frac{600 \times 600}{595 \times 505} \times 1800$ мм, якщо температура зливка при посадці в колодязі рівна $t = 850^\circ \text{C}$.

Рішення

Тривалість нагріву зливка до температури прокатування визначаємо по формулі (1.14.):

$$\tau = kS - 0,006 (t - 200^\circ \text{C}) = 0,1 \cdot 69 - 0,006 (850^\circ \text{C} - 200^\circ \text{C}) = 3 \text{ ч.}$$

Задача № 21. Визначити тривалість нагріву сталевого зливка розмірами $680 \times 680 \times 2000$ з $0,7\% \text{ C}$ до температури прокатування. Злинок садять в піч при $t_0 = 20^\circ \text{C}$.

Рішення

По формулі Н. Ю. Тайца (1.10) час нагріву зливка:

$$\tau = (7,5 + 0,05S) S = (7,5 + 0,05 \cdot 68) \cdot 68 = 741,2 \text{ хв.} = 12,35 \text{ ч.}$$

Питома тривалість нагріву:

$$z = \frac{12,35 * 60}{62} = 10,9 \text{ хв./см}$$

По формулі М. М. Доброхотова (1.8.):

$$\tau = kD\sqrt{D} = 20 * 0,68\sqrt{0,68} = 11,2 \text{ г.}$$

$$z = \frac{12,35 * 60}{62} = 10,9 \text{ хв./см.}$$

Задача № 22. Визначити по формулах (1.12.) і (1.9.) тривалість нагріву заготовки квадратного перетину 140х140 мм завдовжки $l = 1,45$ м із Ст.3 в умовах, приведених в задачі № 14.

Рішення

Час нагріву по формулі Ю. М. Чижикова (1.12.):

$$\tau = kS = 0,1 * 14 = 1,4 \text{ г.}$$

По формулі Н. Н. Доброхотова (1.9.):

$$\tau = ak_1 D\sqrt{D} = 2 * 12,5 * 0,14\sqrt{0,14} = 1,3 \text{ г}$$

(при двосторонньому нагріві).

В табл. 7 приведені режими нагріву зливків і заготовок різних розмірів, що виправдали себе на практиці.

Таблиця 7

Режим, що рекомендується, нагріву злиwkів і заготовок з вуглецевих і легованих сталей [3]

Група	Тип сталі	Сталь	Температура нагріву, °С	Питома тривалість нагріву, хв./см			
				Заготовка квадратна з стороною, мм		Сторона (діаметр) зливка	
				50-150	> 150	до 350 мм (<1т)	Більше 350 мм (>1т)
1	2	3	4	5	6	7	8
I	Технічно чисте залізо	-	1300-1320	Не гранична			
II	Вуглецева та низьколегована (до 0,25% С)	08-25, 15А-25 А, 15Г,20Г, 15Х, 20Х, 10Г2, 15ХГ, 20ХГ, 15ХФ, 15ХМ, 20ХГСА	1220-1240	5,0	6,0	7,5	10,0
III	Вуглецева та низьколегована (до 0,45% С)	30-40, 30Г-40Г, 30Г2 45Г2, 30Х-40Х, 40ХГ, 35ХМ	1200-1200	5,0	6,0	7,5	10,0
IV	Вуглецева та середньо легована (до 0,65% С)	50-60, 50Г, 65Г, 50Г2, 50Х, 50ХГ, 55СГ,ШХ10, 55С2, 60С2, 50ХФА, 30ХГ3, 25ХНВА, 35ХГСА	1180-1200	6,0	7,5	10,0	12,5

Продовження табл.7

1	2	3	4	5	6	7	8
V	Вуглецева та середньо легована(до 0,9% С)	У7, У8, 70-85, У7А, 70Г	1140-1160	6,0	7,5	10,0	12,5
VI	Вуглецева та легована інструментальна і шарікопідшип - нікова	У9,У10, У10А, 7Х3, 9ХС, ХВГ,В1, Х, ШХ6-111Х15,6Х2-ЕХ3	1120-1140	7,5	10,0	12,5	15
VII	Вуглецева та легована інструментальна і високомарганцев	У12, У13, У121,ХГ, Х12,Х12М, ХВ5	1100-1120	7,5	10,0	12,5	15
VIII	Ніхроми та нержавіючі	Х15Н60, Х18Н10Г, 2Х18Н9Т	1200-220	10	12,5	12,5	15
IX	Бистроріжучі	Р9,Р18	1180-1200	15	17,5	20	20

Визначення температурних напруг в сталі при миттєвій зміні температури поверхні

Задачу можна вирішити за допомогою рівняння Н. Ю. Тайца [4], представленого їм в критерійному вигляді [див. формулу (1.16.):

$$\frac{\sigma(1-\psi')}{E} \cdot \frac{1}{a_1(t_0 - t_{II})} = f\left(\frac{a\tau}{S^2}; \frac{x}{S}\right)$$

Задача № 23 [4]. Сталева плита завтовшки $2S = 200$ мм є посаджений в нагрівальну піч при 500°C . Найдти розподіл температурних напруг в плиті через 9 хв. після посадки, якщо в початковий момент температура по всьому перетину плити була 20°C і ніяких залишкових напруг в ній не було.

Рішення

Маємо:

$$S = 0,1 \text{ м}; t_0 = 20^\circ \text{C}; t_{II} = 500^\circ \text{C}; \tau = 0,15 \text{ ч}; \psi' = 0,3$$

Приймаємо: $a = \lambda / c_{pr} = 0,025 \text{ м}^2/\text{Г}$; $a_1 = 12 \cdot 10^{-6}$; $E = 18 \cdot 10^4 \text{ Мн}/\text{м}^2$ ($18 \cdot 10^3 \text{ кГ}/\text{мм}^2$).

1. Обчислюємо критерій

$$F_0 = \frac{a\tau}{S^2} = \frac{0,026 \cdot 0,15}{0,10^2} = 0,38$$

2. Для $x/S = 1$, $f(0,38; 1,0) = 0,32$ (див. мал.9)

$$3. \sigma_y = \sigma_z = E a_1 (t_0 - t_{II}) * f\left(\frac{a\tau}{S^2}; \frac{x}{S}\right) = \frac{18 \cdot 10^4 * 12 \cdot 10^{-6}}{1 - 0,3} (20 - 500) * 0,32 \approx 474 \text{ Мн}/\text{м}^2$$

4. Для решти значень x/S напруги визначаємо тим же методом:

x/S	0,8	0,6	0,4	0,2	0,0
Напруга, Мн/м ² (кГ/мм)	-252 (-25,2)	-30 (-3,0)	119(11,9)	222 (22,2)	266 (26,6)

Розподіл температурних напруг приведений на мал. 9.

Визначення напруг при лінійній зміні температури поверхні

При рішенні таких задач користуються рівняннями Н. Ю. Тайца (1.17.) і (1.18.) [4].

Задача № 24[4]. Сталеву плиту завтовшки $25 = 300 \text{ мм}$ нагрівають в печі з двох сторін з рівномірною швидкістю $400 \text{ град}/\text{ч}$.

Обчислити і побудувати графік зміни температурних напруг в процесі нагріву, якщо в початковий момент температура рівна нулю і ніяких напруг в тілі не було.

Рішення

Маємо: $S = 0,15 \text{ м}$; $C = 400 \text{ град}/\text{ч}$; $a = 0,02 \text{ м}^2/\text{ч}$; $a_1 = 11 \cdot 10^{-6}$; $E = 18 \cdot 10^4 \text{ Мн}/\text{м}^2$; $\psi' = 0,3$.

Для $\tau = 0,1$ $x/S = 1$

$$\frac{a\tau}{S^2} = \frac{0,02 \cdot 0,1}{0,15^2} = 0,089$$

По мал. 10 знаходимо значення функції $f(0,089; 1)$, рівне $0,264$.

По формулі (1.19.) напруга

$$\begin{aligned} \sigma_y = \sigma_z &= \frac{18 \cdot 10^4 * 11 \cdot 10^{-6}}{1 - 0,3} \cdot \frac{400 * 0,15^2}{0,020} \left[\frac{1}{6} (1 - 3) + 0,264 \right] = \\ &= - 87,8 \text{ Мн}/\text{м}^2 \text{ (-8,78 кГ}/\text{мм}^2) \end{aligned}$$

Результати розрахунків для решти проміжків часу і для інших перетинів є приведений в табл. 4 і на рис. 11.

Задача №25 [4]. Температура поверхні сталеві плити завтовшки 400 мм при її нагріві змінюється по графіку, зображеному на рис. 14.

Знайти розподіл напруг по перетину плити і момент часу, відповідні точці С, якщо на початку нагріву температурний градієнт і температурні напруги відсутні.

Рішення

Прийнято: $a = 0,025 \text{ м}^2/\text{ч}$; $a_1 = 11,6 \cdot 10^{-6}$; $E = 17,5 \cdot 10^4 \text{ Мн/м}^2$ ($17,5 \cdot 10^3 \text{ кГ/мм}^2$); $\psi' = 0,3$; $\Delta t = 0$.

Температурну криву мал. 14 розбивають на прямолінійні ділянки $0a$, ab і bc і визначають:

$$1) \tau_1 = 0,5 \text{ ч}, \tau_2 = 1 \text{ ч}, \tau_3 = 0,75 \text{ ч};$$

$$2) C_1 = \frac{150}{0,5} = 300 \text{ град/ч}, C_2 = \frac{200-150}{1,0} = 50 \text{ град/ч}$$

$$3) \frac{a\tau_1}{S^2} = 0,025 \cdot 0,5 = 0,31, \quad \frac{a\tau_2}{S^2} = 0,62, \quad \frac{a\tau_3}{S^2} = 0,47$$

4) $\Phi(0,31; 0) = 0,24$; $\Phi(0,62; 0) = 0,115$; $\Phi(0,47; 0) = 0,165$ знаходимо з рис. 12;

5) різниця температур в крапці a :

$$\Delta t_r = \frac{C_1 S^2}{2a} = \frac{300 \cdot 0,2^2}{2 \cdot 0,025} = 240 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t = \Delta t_r - 2\Phi(\Delta t_r - \Delta t_0) = 240 - 2 \cdot 240 \cdot 0,24 = 125 \text{ }^\circ\text{C};$$

6) різниця температур в крапці b :

$$\Delta t_r = \frac{50 \cdot 0,2^2}{2 \cdot 0,025} = 40 \text{ }^\circ\text{C}, \quad \Delta t_0 = 40 - 2(40 - 125) \cdot 0,115 = 60 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Остання різниця температур увійде до формули (1.17.), див. [4, с. 255];

7) для точки тіла, в якій $x/S = 1$ і $ax/S^2 = 0,47$, з мал. 10 визначають значення функції $f = 0,105$.

Шукану напругу визначають по формулі (1.17.), див. [4, с. 255];

$$\begin{aligned} \sigma_y = \sigma_z &= \frac{Ea_1}{1-\psi'} \left[\frac{CS^2}{6a} \left(\frac{1-3x^2}{S^2} \right) + \frac{CS^2 - 2\Delta t_0}{a} \int \left(\frac{a\tau}{S^2}; \frac{x}{S} \right) \right] x = \\ &= \frac{17,5 \cdot 10^4 \cdot 11,6 \cdot 10^{-6}}{1-0,3} \left[\frac{200 \cdot 0,2^2 \cdot (1-3 \cdot 1^2)}{60,025} + \frac{(200 \cdot 0,2^2 - 2 \cdot 60) \cdot 0,105}{0,025} \right] = \\ &= -249 \text{ Мн/м}^2 \text{ (-24,9 кГ/мм}^2\text{)}. \end{aligned}$$

7) Аналогічним чином знаходять напруги для решти точок:

$$x/S = 0,8; \sigma = -111 \text{ Мн/м}^2 \text{ (11,1 кГ/мм}^2\text{)};$$

$$x/S = 0,2; \sigma = +106 \text{ Мн/м}^2 \text{ (+10,6 кГ/мм}^2\text{)};$$

$$x/S = 0,6; \sigma = -7,7 \text{ Мн/м}^2 \text{ (-0,7 кГ/мм}^2\text{)};$$

$$x/S = 0; \sigma = +124 \text{ Мн/м}^2 \text{ (12,4 кГ/мм}^2\text{)};$$

$$x/S = 0,4; \sigma = +64,7 \text{ Мн/м}^2 \text{ (+6,47 кГ/мм}^2\text{)};$$

Отримані дані представлені графічно на рис. 13.

Методика рішення задач при нагріві в печі з постійною температурою

Задача № 26. [4]. Пливу з середньо вуглецевої сталі завтовшки 250 мм завантажили в піч при 900° С. Побудувати криві зміни температурних напруг на поверхні і в середині плити.

Дано: $\lambda = 30,2$ Вт/мград (26 ккал/м-град); $a = 0,025$ м²/г; $a_1 = 12 \cdot 10^{-6}$; $E = 18 \cdot 10^4$ Мн/м² ($18 \cdot 10^3$ кГУмм²); $\psi' = 0,3$; $\alpha = 122,1$ Вт/м²град (105 ккал/м²*Г*град).

Відомо, що: $S = 0,125$ м; $t_0 = 0$ і $t_{\text{печ}} = 900^\circ \text{ С}$.

Рішення

1. Обчислюють

$$\frac{aS}{\lambda} = \frac{122,1 * 0,125}{30,2} = 0,5$$

2. $\frac{a\tau}{S^2} = \frac{0,025 * 0,1}{0,125^2} = 0,16$ при $\tau = 0,1$ г.

3. З мал. 15 $f_{II}(0,16; 0,5; 1) = + 0,122$ і $f_c(0,16; 0,5; 0) = - 0,055$.

4. Напруги на поверхні визначають по формулі (1.22.):

$$\sigma_y^z = \sigma_z^II = \frac{12 * 10^{-6} * 18 * 10^4 (0 - 900) * 0,122}{1,0 - 0,3} \approx - 339 \text{ Мн/м}^2 \text{ 1,0-0,3}$$

5. Напруги в середині при $x/S = 0$ визначають по формули (1.22.):

$$\sigma_y^c = \sigma_z^c = \frac{12 * 10^{-6} * 18 * 10^4 (0 - 900) * (-0,055)}{1,0 - 0,3} \approx + 155 \text{ Мн/м}^2 \text{ 1,0-0,3}$$

Таким чином визначають напруги для інших проміжків часу. Результати розрахунків представлені у вигляді графіка на рис. 29.

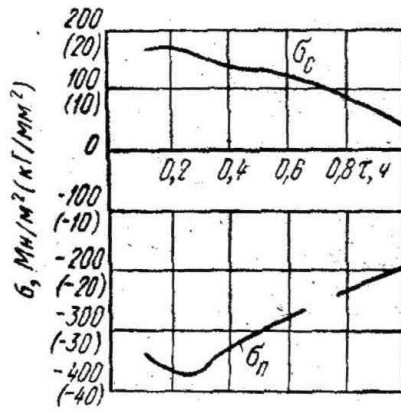


Рисунок 29 - Змін температурних напруг в плиті при постійній температурі печі: σ_n - напруга із поверхні пластини; σ_{cp} - напруга в середині пластини

Завдання до задач № 1 -5

№ варіанта	Сталь	t_0	t_{II}	S	C, град/ч	Δt_{II}
1	08кп	25	1300	5	50	10
2	08ю	25	1300	4	50	10
3	20	25	1300	5	50	10
4	45	25	130	5	7	20
5	20X2H4A	100	1280	10	70	20
6	60	100	1280	10	70	20
7	60Г	100	1280	10	90	20
8	60C2XФА	100	1280	10	90	30
9	20XHP	200	1300	15	90	30
10	40X	200	1300	15	100	30
11	50	200	1300	15	100	30
12	У7	200	1250	15	100	40
13	У8	25	1250	7	100	40
14	4XB2C	25	1250	7	70	40
15	7X3	25	1250	7	70	40
16	У13	25	1250	12	70	50
17	10Г2А	100	1300	12	90	50
18	7X3	100	1300	12	90	50
19	5XГМ	100	1300	12	90	10
20	38XMЮА	200	1280	14	80	10
21	ШХ15	200	1280	14	80	20
22	ШХ15СГ	200	1280	14	80	20
23	ХВГ	300	1260	12	60	30
24	9ХС	300	1260	12	60	30
25	X12	300	1260	12	60	40

Завдання до задач № 6 - 9

1	Сталь 10	У7	20Х2НЧА
2	Сталь 15	У8	25Х2НЧВА
3	Сталь 20	У9	40ХНВА
4	Сталь 30	У10	12Х2Н3МА
5	Сталь 25	У4	13Н2ХА
6	Сталь 35	У12	30ХГНА
7	Сталь 40	У13	30ХГТ
8	Сталь 45	У7	40Х
9	Сталь 50	У8	8ХФ
10	Сталь 55	У9	45ХНМФА
11	Сталь 60	У10	12Х1МФ
12	Сталь 65	У11	ШХ15
13	Сталь 70	У12	ШХ15СТ
14	Сталь 75	У13	ХВГ
15	Сталь 10	У7	9ХС
16	Сталь 15	У8	30ХГСНА
17	Сталь 20	У9	Х12М
18	Сталь 25	У10	60Х2Н
19	Сталь 30	У11	Х23Н18
20	Сталь 35	У12	12Х18Н10Т
21	Сталь 40	У13	Х12Ф1
22	Сталь 45	У7	Р9
23	Сталь 50	У8	Р18
24	Сталь 55	У9	Х13М
25	Сталь 60	У10	38Х5МСФА

Завдання до задачі № 10

№ варіанта	Заготовка	$t_r, ^\circ\text{C}$	$t_0, ^\circ\text{C}$	$\tau_n, \text{ч.}$
1	О 80	11200	20	0,1
2	О 100	1250	30	0,2
3	О 120	1300	40	0,3
4	О 140	1200	50	0,4
5	О 160	1250	80	0,5
6	О 180	1300	100	0,6
7	О 200	1200	120	0,7
8	□ 50	1250	140	0,8
9	□ 80	1300	160	0,9

10	□ 100	1350	180	0,8
11	□ 120	1200	200	1
12	□ 140	1250	220	1Д
13	□ 160	1300	240	1,2
14	□ 180	1350	250	1,3
15	□ 200	1200	270	1,4
16	60x120x6000	1250	290	1,5
17	80x120x6000	1300	300	1,6
18	50x100x6000	1350	310	1,7
19	О 110	1200	320	1,8
20	О 130	1250	350	1,9
21	О 150	1300	360	2

22	О 170	1350	370	0,1
23	□ ПО	1200	300	0,2
24	□ 130	1250	250	0,3
25	□ 150	1300	200	0,4

Завдання до задачі № 11

№ варіанта	Зливоч, мм	Сталь	t _п , °С	t ₀ , °С
1	500x500x2000	20	1240	20
2	550x550x2000	45	1260	40
3	600x600x2000	0,8Ю	1280	60
4	620x620x2000	20Х2Н4А	1300	80
5	640x640x2000	25	1100	100
6	660x660x2000	30	1150	120
7	680x680x2000	35	1180	140
8	700x700x2000	40ХР	1200	160
9	500x500x2500	35ХГ2	1000	150
10	550x550x2500	18ХГН	1050	110
11	600x600x2500	20ХНР	1070	110
12	620x620x2500	40ХФА	1100	100
13	640x640x2500	У7	1120	70
14	660x660x2500	У8	1140	90
15	680x680x2500	У9	1160	50
16	600x600x2200	7Х3	1180	200
17	620x620x2200	25Х2ГНТА	1200	210
18	640x640x2200	50ХФА	1220	230
19	660x660x2200	65Г	1240	250

20	680x680x2200	50X	1260	270
21	400x400x2000	25XГСА	1280	300
22	400x400x2200	35XГФ	1250	310
23	400x400x2500	40XH	1230	330
24	450x450x2000	40XMФА	1210	350
25	450x450x2500	A30	1200	370

Завдання до задачі № 12

№ варіанта	C, %	Розмір зливка	t ₀ , °C	t ₁ , °C	t _{к.п.} , °C
1	0,1	500x500x2000	10	400	1240
2	0,2	520x520x2000	20	500	1250
3	0,3	520x520x2000	30	520	1260
4	0,4	540x540x2000	40	540	270
5	0,5	560x560x2000	50	560	1280
6	0,6	580x580x2000	60	580	1255
7	0,7	600x600x2000	70	600	1265
8	0,8	620x620x2000	80	510	1275
9	0,9	640x640x2000	90	530	1285
10	1	660x660x2000	100	550	1250
11	1,1	680x680x2000	ПО	570	1260
12	1,2	700x700x2000	120	590	1270
13	1,3	500x500x2500	130	610	1280
14	0,1	520x520x2500	140	620	1200
15	0,2	540x540x2500	150	630	1210
16	0,3	560x560x2500	160	640	1220
17	0,4	580x580x2500	170	650	1230
18	0,5	600x600x2500	180	660	1240
19	0,6	620x620x2500	190	170	1250
20	0,7	640x640x2500	200	680	1260
21	0,8	660x660x2500	210	690	1270
22	0,9	700x700x2500	220	700	1280
23	1	720x720x2500	230	710	1250
24	1,1	740x740x2500	240	720	1260
25	1,2	760x760x2500	250	730	1270

Завдання до задачі № 13

№ варіанта	Вміст С, %	Розмір зливка	$t_{п}$, °C	$t_{к.п.}$, °C	Δt , °C	$t_{в}$, °C
1	0,1	$\frac{690 \times 600}{595 \times 505} \times 1800$	850	1250	50	20
2	0,2	$\frac{690 \times 550}{590 \times 500} \times 1800$	850	1260	60	21
3	0,3	$\frac{690 \times 540}{590 \times 500} \times 1800$	850	1270	70	22
4	0,4	$\frac{690 \times 530}{590 \times 500} \times 1800$	840	1280	50	23

5	0,5	$\frac{690 \times 520}{590 \times 500} \times 1800$	840	1260	60	24
6	0,6	$\frac{690 \times 510}{590 \times 500} \times 1700$	840	1270	70	25
7	0,7	$\frac{670 \times 510}{570 \times 500} \times 1700$	830	1280	50	26
8	0,8	$\frac{670 \times 510}{570 \times 500} \times 1700$	830	1240	60	27
9	0,9	$\frac{670 \times 510}{570 \times 500} \times 1700$	830	1255	70	28
10	1	$\frac{660 \times 510}{560 \times 500} \times 1700$	820	1265	55	29
11	1,1	$\frac{660 \times 510}{560 \times 500} \times 1600$	820	1275	65	30
12	1,2	$\frac{660 \times 510}{560 \times 500} \times 1600$	820	1280	75	31
13	1,3	$\frac{650 \times 510}{550 \times 500} \times 1600$	820	1250	55	32
14	1,2	$\frac{650 \times 510}{550 \times 500} \times 1600$	810	1250	65	33
15	1,1	$\frac{650 \times 510}{550 \times 500} \times 1600$	810	1240	75	34
16	1,0	$\frac{680 \times 590}{580 \times 500} \times 1500$	810	1240	50	35
17	0,9	$\frac{670 \times 590}{570 \times 550} \times 1500$	800	1260	60	25
18	0,8	$\frac{660 \times 590}{560 \times 550} \times 1500$	800	1260	70	26

19	0,7	$\frac{650 \times 590}{550 \times 550} \times 1500$	800	1270	50	87
20	0,6	$\frac{640 \times 580}{540 \times 550} \times 1500$	850	1270	60	28
21	0,5	$\frac{680 \times 580}{580 \times 480} \times 1700$	850	1250	70	29
22	0,4	$\frac{680 \times 570}{580 \times 470} \times 1700$	840	1250	50	30
23	0,3	$\frac{680 \times 560}{580 \times 460} \times 1700$	840	1260	60	31
24	0,2	$\frac{680 \times 550}{580 \times 450} \times 1800$	830	1260	70	32
25	0,1	$\frac{680 \times 540}{580 \times 440} \times 1800$	830	1270	50	33

Завдання до задачі № 14

№ варіанта	Розмір заготовки	$t_{к.п.}, ^\circ\text{C}$	$G, \text{т/ч}$	$t_{н}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{к}, ^\circ\text{C}$
1	100x100x1500	1250	50	20	40
2	110x120x1500	1260	52	22	45
3	130x130x1500	1270	54	24	50
4	140x140x1500	1280	55	26	55
5	150x150x1500	1240	56	28	60
6	100x100x1700	1240	57	30	40
7	110x110x1700	1250	58	25	40
8	120x120x1700	1250	59	27	50
9	130x130x1700	1260	60	29	50
10	140x140x1700	1270	51	32	55
11	150x150x1700	1270	51	32	55
12	50x50x1800	1270	52	34	60
13	60x60x1800	1280	53	35	60
14	70x70x1800	1280	54	36	40
15	80x80x1800	1250	55	38	40
16	90x90x1800	1250	56	40	45
17	100x100x1800	51260	57	42	45
18	110x110x1700	1260	58	44	50
19	120x120x1700	1270	59	45	50
20	130x130x1700	1270	60	47	55
21	140x140x1700	1280	61	48	55
22	150x150x1500	1280	62	49	60
23	100x100x1500	1250	63	25	60
24	110x110x1600	1260	64	27	50
25	120x120x1600	1270	65	29	50

Завдання до задач № 15 - 17

№ варіанта	Розмір круглих зливків	h	t _{к.п.} , °C	t _{н.} , °C	Δt _{к.} , °C	G, т/ч	t _{заг.} , °C
1	100	1500	1250	20	40	30	1000
2	120	1600	1260	25	45	32	1050
3	140	1700	1270	30	50	34	1100
4	160	1800	1280	35	55	35	1150
5	180	1500	1240	40	60	36	1200
6	200	1600	1250	21	40	37	1020
7	220	1700	1260	22	42	38	1040

8	240	1800	1270	23	44	39	1060
9	260	1500	1280	24	46	40	1080
10	280	1600	1240	25	48	30	1100
11	300	1700	1250	26	50	31	1120
12	320	1800	1260	27	52	33	1140
13	340	1400	1270	28	54	35	1160
14	360	1450	1280	29	56	37	1180
15	380	1500	1240	30	58	39	1200
16	400	1550	1250	32	60	41	1220
17	100	1600	1260	34	62	43	1240
18	120	1650	1270	36	50	45	1000
19	160	1700	1280	38	48	47	1030
20	200	1750	1240	40	46	49	1060
21	240	1600	1250	20	44	50	1090
22	280	1500	1260	22	42	51	1120
23	320	1400	1270	24	40	30	1150
24	360	1700	1280	26	20	35	1180
25	400	1800	1250	30	30	45	1050

Завдання до задачі № 18

№ варіанта	Розмір заготовки	t _{пов.}	l _{акт.}	l _{под.}	l _{св.}	l _{том.}	G, т/ч
1	100x100x1200	1240	25,5	12,1	6,5	5,5	35
2	110x110x1200	1240	25,6	12,2	6,6	5,6	35,1
3	120x120x1200	1240	25,7	12,3	6,7	5,7	35,2
4	130x130x1200	1240	25,8	12,4	6,8	5,8	35,3
5	140x140x1200	1250	25,9	12,5	6,9	5,9	35,4

6	150x150x1200	1250	26	12,6	7,0	6	35,5
7	100x100x1250	1250	26,1	12,7	7,1	6,1	35,6
8	110x110x1250	1260	26,2	12,8	7,2	6,2	35,7
9	120x120x1250	1260	26,3	12,9	7,3	6,3	35,8
10	130x130x1250	1260	26,4	13	7,4	6,4	35,9
11	140x140x1250	1270	26,5	13,1	7,5	6,5	36
12	150x150x1250	1270	26,6	13,2	6,5	5,5	36,1
13	100x100x1300	1270	26,7	13,3	6,6	5,6	36,2
14	110x110x1300	1270	26,8	13,4	6,7	5,7	36,3
15	120x120x1300	1255	26,9	13,5	6,8	5,8	36,4
16	130x130x1300	1255	27	13,6	6,9	5,9	36,5
17	140x140x1300	1255	27,1	13,7	6,7	5,7	36,6
18	150x150x1300	1265	27,2	13,8	6,7	5,7	36,7

19	100x100x1350	1265	27,3	13,9	6,6	5,6	36,8
20	110x110x1350	1265	27,4	14	6,6	5,6	36,9
21	120x120x1350	1275	27,5	14,1	6,5	5,5	37
22	130x130x1350	1275	27,6	14,2	6,7	5,7	35,2
23	140x140x1350	1275	27,7	14,3	6,6	5,6	35,4
24	150x150x1350	1260	27,8	14,4	6,5	5,5	35,6
25	120x120x1350	1270	27,9	14,5	6,4	5,4	36,3

Завдання до задачі № 19

№ варіанта	Розмір заготовки	$T_{\text{ухлд}}$	$\Delta t_1, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_2, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_3, ^\circ\text{C}$
1	100x100x1200	800	78	170	26
2	110x110x1200	750	79	165	27
3	120x120x1200	760	80	164	25
4	130x130x1200	770	70	163	24
5	140x140x1200	780	71	162	23
6	150x150x1200	790	72	161	22
7	100x100x1250	810	73	160	25
8	110x110x1250	820	74	166	26
9	120x120x1250	830	75	167	27
10	130x130x1250	840	76	168	28
11	140x140x1250	850	77	169	29
12	150x150x1250	840	78	170	30
13	100x100x1300	830	79	171	27
14	110x110x1300	820	80	172	28
15	120x120x1300	810	81	173	29
16	130x130x1300	800	82	174	26
17	140x140x1300	790	83	175	25

18	150x150x1300	780	84	176	30
19	100x100x1350	770	85	177	31
20	110x110x1350	760	77	178	32
21	120x120x1350	750	76	179	33
22	130x130x1350	800	75	180	34
23	140x140x1350	810	74	181	35
24	150x150x1350	820	73	170	25
25	120x120x1350	830	72	175	27

Завдання до задачі № 20 - 22

№ варі-анта	C, %	Розмір зливка	t, °C	t ₀ , C	Розмір зливка
1	од	$\frac{690 \times 600}{595 \times 505} \times 1800$	800	10	500x500x2000
2	0,2	$\frac{690 \times 550}{590 \times 500} \times 1800$	810	20	520x520x2000
3	0,3	$\frac{690 \times 540}{590 \times 500} \times 1800$	820	30	520x520x2000
4	0,4	$\frac{690 \times 530}{590 \times 500} \times 1800$	830	40	540x540x2000
5	0,5	$\frac{690 \times 520}{590 \times 500} \times 1800$	840	50	560x560x2000
6	0,6	$\frac{690 \times 510}{590 \times 500} \times 1700$	850	60	580x580x2000
7	0,7	$\frac{670 \times 510}{570 \times 500} \times 1700$	860	70	600x600x2000
8	0,8	$\frac{670 \times 510}{570 \times 500} \times 1700$	870	80	620x620x2000
9	0,9	$\frac{670 \times 510}{570 \times 500} \times 1700$	880	90	640x640x2000
10	1	$\frac{660 \times 510}{560 \times 500} \times 1700$	890	100	660x660x2000
11	1,1	$\frac{660 \times 510}{560 \times 500} \times 1600$	900	ПО	680x680x2000
12	1,2	$\frac{660 \times 510}{560 \times 500} \times 1600$	800	120	700x700x2000
13	1,3	$\frac{650 \times 510}{550 \times 500} \times 1600$	810	130	500x500x2500
14	1,2	$\frac{650 \times 510}{550 \times 500} \times 1600$	820	140	520x520x2500
15	1,1	$\frac{650 \times 510}{550 \times 500} \times 1600$	830	150	540x540x2500
16	1,0	$\frac{680 \times 590}{580 \times 500} \times 1500$	840	160	560x560x2500

17	0,9	$\frac{670 \times 590}{570 \times 550} \times 1500$	850	170	580x580x2500
18	0,8	$\frac{660 \times 590}{560 \times 550} \times 1500$	860	180	600x600x2500
19	0,7	$\frac{650 \times 590}{550 \times 550} \times 1500$	870	190	620x620x2500

20	0,6	$\frac{640 \times 580}{540 \times 550} \times 1500$	880	200	640x640x2500
21	0,5	$\frac{680 \times 580}{580 \times 480} \times 1700$	890	210	660x660x2500
22	0,4	$\frac{680 \times 570}{580 \times 470} \times 1700$	900	220	700x700x2500
23	0,3	$\frac{680 \times 560}{580 \times 460} \times 1700$	800	230	720x720x2500
24	0,2	$\frac{680 \times 550}{580 \times 450} \times 1800$	810	240	740x740x2500
25	0,1	$\frac{680 \times 540}{580 \times 440} \times 1800$	820	250	760x760x2500

Завдання до задачі № 23 - 26

№ варіант	2S	t _{нач} , °C	τ, хв	t _п , °C	V, град/ч	t _{заг} , °C
1	140	20	7	500	350	900
2	160	22	8	520	360	910
3	180	24	9	540	370	920
4	200	26	10	560	380	930
5	220	28	11	580	390	940
6	240	30	12	600	400	950
7	260	32	13	510	410	960
8	280	34	14	530	420	970
9	130	36	15	550	430	980
10	150	38	7	570	440	990
11	170	40	8	590	450	1000
12	190	42	9	610	440	905
13	210	44	10	620	430	915
14	230	46	11	640	420	925
15	250	48	12	660	410	935
16	270	50	13	680	400	945
17	290	52	14	700	390	955
18	145	54	15	630	380	965
19	165	56	7	650	370	975

20	175	58	8	670	360	985
21	185	60	9	690	400	995
22	205	25	10	500	420	900
23	225	30	11	530	440	950
24	245	35	12	560	460	970
25	220	40	13	550	480	930

ЛІТЕРАТУРА

1. Малый С. А. Экономический нагрев металла. Изд-во «Металлургия», 1967.
2. Зуев М. И. и др. Пластичность стали при высоких температурах. Metallurgizdat, 1954.
3. Чижиков Ю. М. Процесс обработки давлением легированных сталей и сплавов. Изд-во «Металлургия», 1965.
4. Тайц Н. Ю. Технология нагрева стали. Metallurgizdat, 1962.
5. Мариенбах Л. М. Теория и конструкция нагревательных печей. Mashgiz, 1940.
6. Ицкович Н. М. Методы приближенных расчетов нагревательных печей. Metallurgizdat, 1957
7. Кулаков В. Ф., Плотников П. И. Сталь, 1961, 3 11, с. 1035,
8. Кулаков В. Ф. Нагрев стали в печи; Metallurgizdat, 1955.
9. Глинков М. А. Основы общей теории печей. Metallurgizdat, 1962.
10. Гуляев А. П. Metallovedenie. Metallurgiya, 1966.
11. Кащенко Н. А. Основы metallovedeniya. Metallurgizdat, 1956.
12. Гудрен Э. Специальная сталь. Metallurgiya, 1966.
13. Штейнберг С. С. Metallovedenie. Metallurgiya, 1961.
14. Чижиков Ю. М. Процесс обработки давлением легированных сплавов. Изд-во «Металлургия», 1965.
15. Тайц Н. Ю. Технология нагрева стали. Metallurgizdat, 1962.
16. Зароцинский М. Л. Технологические основы проектирования прокатных станов. Metallurgizdat, 1962.
17. Тарновский И. Я. Механические свойства стали при горячей обработке давлением. Изд-во «Металлургия», 1966.
18. Мариенбах Л. М. Теория и конструкция нагревательных печей. Mashgiz, 1940.
19. Справочник. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике. Изд-во «Энергия», 1967.
20. Теплофизические свойства веществ (справочник). ГЭИ, 1956.
21. Тайц Н. Ю., Розенгарт Ю. Н. Методические нагревательные печи Metallurgizdat, 1964.
22. Чижиков Ю. М. Прокатка и ковка высоколегированных сталей. Metallurgizdat, 1941.

23. Мастеров В.А., Берковский В.С. Теория пластической деформации и обработка металла давлением. Изд-во «Металлургия» 1970.

24. Кутателадзе С.С., Борищанский В.М. Справочник по теплопередаче. Госэнергоиздат, 1959.

25. Чижиков Ю. М. Прокатное производство. Metallurgizdat, 1958.

26. Гинцбург Я.С., Андрацкий К. К. Прокатка качественной стали Metallurgizdat, 1953.

Зміст

Вступ	3
1. Нагрів сталі і стопів	
1.1. Основні формули і методика розрахунку	4
1.2. Методика рішення задач за визначенням напруг при миттєвій зміні температури поверхні	20
2. Приклади рішення задач	32
3. Індивідуальні завдання	55
Література	65
Зміст	66