

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ
ФАЗ ПРИ ШВИДКОМУ ОХОЛОДЖЕННІ СТАЛЕВИХ ТІЛ**

Запропоновано математичну модель для кількісного аналізу фазового складу сталевих виробів. При розрахунках використано співвідношення статистичної теорії вивчення впливу умов охолодження та хімічного складу сталей на їх фазовий склад і результати дослідження теплових полів у двовимірних твердих тілах при швидкому охолодженні. Встановлено розподіл фаз у сталевих профілях прямокутного і квадратного перерізу при гартуванні.

З теорії термічної обробки відомо, що режим охолодження виробів є одним з визначальних факторів при формуванні фазового складу сплавів і, як наслідок, комплексу заданих експлуатаційних властивостей [6]. Також встановлено, що фазовий склад матеріалу виробу в цілому, як правило, є неоднорідним, що підтверджується експериментальними роботами з вимірювань твердості гартованих виробів по глибині [3].

Типові операції термічної обробки, зокрема гартування сталевих виробів, здійснюються за умов початкового рівномірного розподілу температури в тілі та однорідних уздовж усієї його поверхні умов його охолодження. У випадках, коли форма тіла є близькою до пластинчастої, кулястої чи форми довгого кругового циліндра, при рівномірній початковій температурі та однорідних зовнішніх умовах охолодження фазовий склад термооброблених тіл змінюється тільки в міру віддалення від поверхні [1]. Форма переважної більшості виробів звичайно не співпадає з перерахованими вище пластиною, кулею чи довгим циліндром. Вона є додатковим чинником, який впливає на формування фазового складу тіла по глибині та вздовж поверхні.

У цій роботі ставиться за мету дослідити процес формування просторового розподілу фаз у довгих сталевих виробках квадратного та прямокутного перерізу при швидкому охолодженні за умов однорідного охолоджуючого середовища. Під швидким охолодженням розуміємо таке охолодження, яке створює умови для виникнення у сталі гартувальних структур.

При невисоких швидкостях охолодження формується фазовий склад, близький до того, який передбачується рівноважною діаграмою стану. У роботі [4] показано, що мартенситна фаза у сталях виникає, коли тривалість охолодження в діапазоні температур $850\div 500^\circ\text{C}$ не перевищує 60 с; у випадках, коли названа тривалість є більшою ніж 200 с, маємо повністю рівноважний фазовий склад. Обмежимося розглядом таких умов охолодження, коли виконується вимога появи мартенситної складової у структурі матеріалу. Досліджуване тіло є довгим паралелепіпедом поперечний переріз якого – квадрат або прямокутник. У припущенні незалежності температурного поля від координати вздовж осі, паралельної до найдовшого ребра паралелепіпеда, задача зводиться до розв'язання просторово двовимірного рівняння теплопровідності.

При простих режимах охолодження, пов'язаних із неперервним відбором тепла та монотонним зниженням температури в кожній точці тіла, визначення фазового складу тіла зі сталі можна звести до відшукування одного параметра, а саме – тривалості Δt перебування матеріалу в діапазоні температур $850\div 500^\circ\text{C}$. У роботі [4] створено математичну модель для розрахунку фазового складу сталей на основі визначення величини Δt . Отримані там співвідношення не враховують того, що при всіх реально здійснених режимах охолодження кожна точка тіла має свою індивідуальну історію зміни температури в часі і, як наслідок, відповідний фазовий склад. У роботі [1] аналітичні співвідношення із [4] разом з розв'язками рівнянь теплопровідності використано для аналізу фазового складу найпростішого за гео-

метрією об'єкту – пластини. Таке поєднання є можливим тоді, коли термічна історія і фазовий склад у вибраній точці не залежать від історії і стану близького довкілля.

Пропонована робота є логічним продовженням [1] і стосується складніших за геометрією об'єктів.

Набір співвідношень, необхідних для визначення фазового складу, включає рівняння теплопровідності у декартових координатах

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

за однорідних початкових умов

$$T(0, x, y) = T_0, \quad (2)$$

та умов конвективного теплообміну на бічних гранях паралелепіпеда

$$\lambda \nabla_n T = \alpha(T - T_s), \quad x, y \in \Gamma. \quad (3)$$

У співвідношеннях (1)–(3) T – температура; τ – час; ρ – густина матеріалу; c – питома теплоємність; λ – коефіцієнт теплопровідності; T_0 – початкова температура; $\nabla_n T$ – нормальна складова вектора теплового потоку на поверхні Γ ; T_s – температура зовнішнього середовища. У довгих паралелепіпедів бічна поверхня Γ є значно більшою від поверхні торців, тому при охолодженні втрата тепла через останні є незначною і нею можна знехтувати.

Рівняння (1) розв'язуємо за припущення, що твердофазне перетворення не сильно впливає на процес теплопровідності (як і в [5]). Приймаємо також, що теплофізичні характеристики матеріалу не залежать від температури.

Основна інформація для визначення фазового складу в кожній точці поперечного перерізу, яку нам треба отримати з розв'язку задачі (1)–(3), є тривалість перебування точки в інтервалі температур 850÷500°C. Для цього слід розв'язати два рівняння

$$T(x, y, \tau_1) = 850^\circ\text{C}, \quad T(x, y, \tau_2) = 500^\circ\text{C}, \quad (4)$$

де τ_1 і τ_2 – моменти часу, коли в точці з координатами (x, y) була досягнута температура 850 і 500°C відповідно.

Шуканою величиною $\Delta\tau$ є

$$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1, \quad (5)$$

яка визначає фазовий склад у кожній точці тіла з координатами (x, y) .

Для знаходження вмісту мартенситу M , бейніту B , ферито-перлітної складової $(F + P)$ у сталі після охолодження скористаємось встановленими у [4] співвідношеннями

$$\begin{aligned} M(\tau) &= 100 \left(1 - f \left(\frac{\ln(\Delta\tau) - \ln(\tau_n)}{\ln(S_m)} \right) \right) [\%], \\ (F + P)(\tau) &= 100 f \left(\frac{\ln(\Delta\tau) - \ln(\tau_{f+p})}{\ln(S_{f+p})} \right) [\%], \end{aligned} \quad (6)$$

$$B(\tau) = 100 - M(\tau) - (F + P)(\tau) [\%],$$

де f – функція нормального розподілу.

Коефіцієнти, що входять у (6), є функціями хімічного складу сталі та визначаються із простих співвідношень [4]

$$\begin{aligned} \ln(\tau_m) &= -2.10 + 15.50 C + 0.96 Mn + 0.84 Si + 0.77 Cr + 0.74 Mo + \\ &\quad + 0.7 Ni + 0.3 V + 4.0 Al + 0.5 W + 0.8 Cu - 13.5 C^2, \\ \ln(S_m) &= -0.56 - 0.41 C + 0.10 Mn + 0.14 Cr + 0.30 Mo + 2.7 Ti + \\ &\quad + 1.1 Nb + 0.5 Cu - 1.7 C Mo, \\ \ln(\tau_{f+p}) &= 0.34 + 5.20 C + 1.8 Mn + 0.53 Si + 0.33 Cr + 2.90 Mo + \\ &\quad + 1.30 Ni + 1.50 W + 1.00 Cu - 5.10 C^2, \\ \ln(S_{f+p}) &= 0.91 - 0.90 C + 0.09 Mn + 0.08 Cr + 0.34 Mo + 0.15 Ni + \\ &\quad + 0.85 V + 2.2 Ti + 0.43 W, \end{aligned} \quad (7)$$

де символи хімічних елементів визначають їх вміст у відсотках.

Задача (1)–(3) розв'язана методом скінченних елементів [2] для випадків тіл квадратних і прямокутних перерізів при різних значеннях коефіцієнта теплообміну для групи сталей з близькими коефіцієнтами теплопровідності. Для числових розрахунків прийнято, що $T_0 = 900^\circ\text{C}$, $T_c = 20^\circ\text{C}$, коефіцієнт тепловіддачі $\alpha = 8.374 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

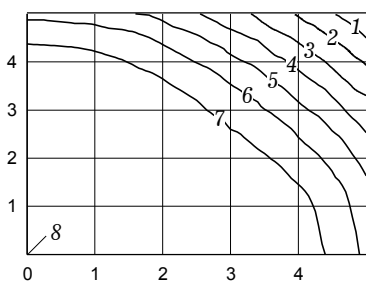


Рис. 1

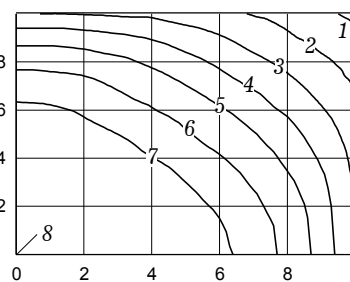


Рис. 2

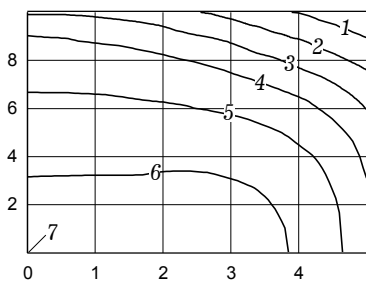


Рис. 3

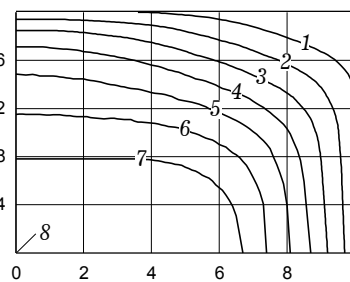


Рис. 4

На рис. 1–4 наведено графіки ізохрон, тобто ліній, на яких розміщені точки тіла з однаковою тривалістю перебування в інтервалі температур $850 \div 500^\circ\text{C}$, отримані відповідно для квадратних і прямокутних перерізів $10 \times 10 \text{ мм}^2$, $20 \times 20 \text{ мм}^2$, $10 \times 20 \text{ мм}^2$, $20 \times 40 \text{ мм}^2$.

У зв'язку з симетрією подаємо зображення лише четвертої частини перерізу. Тривалості охолодження Δt , які відповідають номерам ізохрон, наведено в табл. 1–4.

Таблица 1

10×10 мм ²							
Изохрони		сталь 15ХМ		сталь 13Н2ХМА		сталь 12Х1МФ	
№	Δτ, с	М, %	В, %	М, %	В, %	М, %	В, %
1	0.30	100.0	0.0	100.0	0.0	99.6	0.3
2	0.40	99.5	0.4	100.0	0.0	98.4	1.4
3	0.50	98.7	1.1	100.0	0.0	96.2	3.4
4	0.60	97.2	2.4	100.0	0.0	92.9	6.5
5	0.70	95.0	4.3	100.0	0.0	88.6	10.5
6	0.80	92.2	6.7	100.0	0.0	83.6	15.0
7	1.00	85.0	12.9	100.0	0.0	72.5	25.1
8	1.04	83.4	14.3	100.0	0.0	70.2	27.1

Таблица 2

20×20 мм ²							
Изохрони		сталь 15ХМ		сталь 13Н2ХМА		сталь 12Х1МФ	
№	Δτ, с	М, %	В, %	М, %	В, %	М, %	В, %
1	0.30	99.9	0.1	100.0	0.0	99.6	0.3
2	0.70	95.0	4.2	100.0	0.0	88.6	10.5
3	1.10	80.9	16.4	99.8	0.2	66.9	30.2
4	1.50	63.5	30.7	99.0	0.9	46.4	47.8
5	1.90	47.7	42.7	97.3	2.6	31.2	59.9
6	2.30	35.1	51.2	94.5	5.3	20.8	66.8
7	2.60	27.7	55.4	91.8	8.0	15.3	69.6
8	2.78	23.8	57.2	89.8	9.9	12.7	70.5

Таблица 3

10×20 мм ²							
Изохрони		сталь 15ХМ		сталь 13Н2ХМА		сталь 12Х1МФ	
№	Δτ, с	М, %	В, %	М, %	В, %	М, %	В, %
1	0.40	99.5	0.4	100.0	0.0	98.4	1.4
2	0.60	97.2	2.4	100.0	0.0	92.9	6.5
3	0.80	92.2	6.7	100.0	0.0	83.6	15.0
4	1.00	85.0	12.9	99.9	0.1	72.5	25.1
5	1.25	74.4	21.8	99.6	0.4	58.5	37.3
6	1.50	63.5	30.7	99.0	0.9	46.4	47.8
7	1.62	59.0	34.5	98.6	1.3	41.3	51.9

Таблица 4

20×40 мм ²							
Изохрони		сталь 15ХМ		сталь 13Н2ХМА		сталь 12Х1МФ	
№	Δτ, с	М, %	В, %	М, %	В, %	М, %	В, %
1	1.00	85.0	12.9	99.9	0.1	72.5	25.1
2	1.50	63.5	30.7	99.0	0.9	46.4	47.8
3	2.00	44.3	45.2	96.6	3.2	28.2	62.0
4	2.50	30.0	54.2	92.7	7.0	17.0	68.9
5	3.00	20.2	58.6	87.4	12.2	10.3	71.1
6	3.50	13.6	59.9	81.2	18.3	6.3	70.7
7	4.00	9.3	59.1	74.5	24.8	4.0	68.9
8	4.51	6.3	57.2	67.7	31.6	2.5	66.2

На основі співвідношень (6), (7) у відповідність кожній ізохроні ставиться вміст мартенситу та бейніту. Отримані розрахункові дані для трьох сталей (15ХМ, 13Н2ХА, 12Х1МФ) також подано в табл. 1-4.

Хімічний склад сталей наступний:

сталь 15ХМ –	0.15% С,	0.7% Cr,	0.2% Мо;	
сталь 13Н2ХА –	0.13% С,	2% Ni,	0.7% Cr,	0.2 Мо;
сталь 12Х1МФ –	0.12% С,	0.7%Cr,	0.2 Мо,	0.2% V.

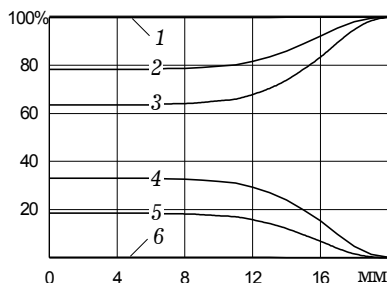


Рис. 5

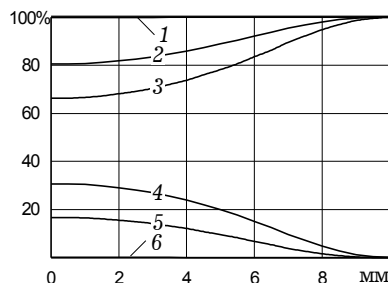


Рис. 6

На рис. 5, 6 зображено розподіли мартенситної M (криві 1-3 відповідають сталям 13Н2ХА, 15ХМ, 12Х1МФ) і бейнітної B (криві 4-6 відповідають сталям 15ХМ, 12Х1МФ, 13Н2ХА) складових на поверхні вздовж довшої та коротшої сторони зразка прямокутної форми 20×40 мм². Зразки, виготовлені зі сталі 13Н2ХА, при заданих умовах охолодження і геометрії мають однорідний фазовий склад вздовж поверхні (вміст мартенситу близький до 100%).

Як видно з отриманих результатів, максимальний вміст гартувальної складової маємо в околі кутових точок перерізів. Це пояснюється тим, що при однорідних зовнішніх умовах охолодження саме там маємо найінтенсивніше відведення тепла. Максимальний вміст мартенситу в цих точках не залежить від форми перерізу (квадрат чи співвимірний з ним прямокутник). Перепад між максимальним і мінімальним значенням вмісту мартенситу залежить від розмірів і форми перерізу. Чим більша площа перерізу, тим більшою є різниця між максимальним і мінімальним значеннями вмісту мартенситу, оскільки збільшення розмірів перерізу приводить до сповільнення охолодження глибинних шарів зразка і послаблення ефекту гартування.

Розроблена методика може бути використана для розрахунку фазового складу профілів більш складної форми, ніж квадрат і прямокутник, а також у випадках складних і неоднорідних умов охолодження та температурної залежності теплофізичних властивостей матеріалів.

1. Асташкін В. І., Іваник Є. Г. Аналітичне дослідження просторово-неоднорідного структурного стану сталеві пластина при швидкому охолодженні // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1993. – 29, № 6. – С. 101-104.
2. Будз С. Ф., Дробенко Б. Д., Михайлишин В. С. Компьютерное моделирование термоупругопластического поведения механических систем. – Львов, 1992. – 60 с. – (Препр. / АН УССР. Ин-т прикл. проблем механики и математики, № 34-89).
3. Гроссман М. А. Основы термической обработки. – М.: Металлургиздат, 1946. – 248 с.
4. Касаткин О. Г., Зайферт П. Интерполяционные модели для оценки фазового состава зоны термического влияния при дуговой сварке низколегированных сталей // Автомат. сварка. – 1984. – № 1. – С. 7-11.
5. Ломакин В. А. Превращение аустенита при произвольном режиме охлаждения // Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. – 1958. – № 2. – С. 20-25.
6. Новиков И. И. Теория термической обработки. – М.: Металлургия, 1986. – 480 с.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ФАЗ ПРИ БЫСТРОМ ОХЛАЖДЕНИИ СТАЛЬНЫХ ТЕЛ**

Предложена математическая модель для количественного анализа фазового состава стальных изделий. При расчетах использованы соотношения статистической теории изучения влияния условий охлаждения и химического состава стали на их фазовый состав и результаты исследования тепловых полей в двумерных твердых телах при быстром охлаждении. Установлено распределение фаз в стальных профилях прямоугольного и квадратного сечения при закалке.

**INVESTIGATION OF PROCESS OF PHASE SPATIAL DISTRIBUTION
AT RAPID COOLING OF STEEL SOLIDS**

A mathematical model for numerical description of phase content of steel products is proposed. The statistical theory for cooling conditions and steel chemical content influence on their phase content and also the results of investigation of temperature field in 2D solids are used for calculations. The phase distribution in steel profiles of rectangular and square cross-section during hardening is found.

Ін-т прикл. проблем механіки і математики
ім. Я. С. Підстригача НАН України, Львів

Одержано
12.03.01