

В. В. Кухар¹
О. О. Тузенко¹
О. Ю. Балалаєва¹
О. В. Василевський²

РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ МЕТОДИКИ АПРОКСИМАЦІЇ ДІАГРАМ РЕКРИСТАЛІЗАЦІЇ ДЛЯ ВИБОРУ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ РЕЖИМІВ КУВАННЯ, ЩО ПІДВИЩУЮТЬ ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОКОВОК ВАЛІВ

¹ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Маріуполь;

²ТОВ «Метінвест — Маріупольський ремонтно-механічний завод»

Розроблена автоматизована методика апроксимації складних тривимірних діаграм рекристалізації і складена прикладна програма, що дозволяє в проектному або оперативному режимі визначати розміри зерна і механічні властивості матеріалу у заданих термомеханічних режимах кування поковок і оцінювати їх експлуатаційну міцність і довговічність.

Ключові слова: діаграма рекристалізації, апроксимація, розмір зерна, механічні властивості, поківки валів.

Вступ

Деталі валів, до яких відносять ротори турбін, приводні і гребні вали кораблів, прокатні валки, вагонні осі, ролики рольгангів тощо, — як правило, функціонують у важких умовах і до них висувають підвищені вимоги щодо міцності і довговічності. Великі вали отримують способами кування із зливків на гідравлічних пресах, при цьому механічні властивості кованих виробів залежать від розмірів зерен металу, інтенсивність зростання яких визначається термомеханічними режимами кування. Призначення технологічних режимів обробки тиском (температури деформації, величин і порядку обтискань) виконують з урахуванням отримання певного розміру зерна матеріалу, що деформується [1]. Для цього використовують діаграми рекристалізації, що є складними тривимірними графіками, на яких приводиться залежність середньої величини зерна D від ступеня деформації (ϵ , %) і температури (t , °C) відпалу або деформації [2]. Такі діаграми можуть бути узяті з технічної літератури або побудовані в результаті власних дослідів для конкретного матеріалу і виробничих умов. Для оперативного і точного вибору сприятливих термомеханічних режимів при проектуванні процесів гарячої деформації, що забезпечують необхідні експлуатаційні властивості виробів, доцільна розробка автоматизованої методики обробки та аналізу масиву даних, за якими будують діаграми рекристалізації, що до теперішнього часу не виконане.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Як відомо, для подрібнення литої структури металу і досягнення високих експлуатаційних властивостей виробів, викуваних із зливків, необхідно забезпечувати уков (Y) не менше 3,0. При куванні валів найбільш трудомісткою є операція ковальського протягування, яку здійснюють в бойках різної конструкції. Під уковом при протягуванні розуміють відношення початкової площі F_0 поперечного перетину заготовки (зливка) до площі F_k поперечного перетину поковки (або кованого напівфабрикату), тобто потрібно виконувати умову: $Y = F_0 / F_k \geq 3,0$. На сьогодні розроблені технологічні рішення в області кування великих поковок, засновані на реалізації ефекту макрозсувів [3], що дозволяє інтенсифікувати пластичну деформацію, забезпечити якісне опрацювання

литого металу за менших величин уковів і тим самим скоротити трудомісткість і енергоспоживання під час кування. Недоліком вказаних рішень є ускладнення конструкцій бойків або зливків, що робить виправданним їх застосування тільки у разі кування дорогих легованих марок сталей. Також запропоновані технологічні режими кування валів з обкаткою по діаметру заготовки в комбінованих бойках, що дозволяють досягти ефекту макрозсувів без ускладнення конструкції робочого інструменту [4]. Для підвищення ефективності таких режимів необхідно на останніх обтисканнях, що виконують, наприклад, при нижньому значенні інтервалу кувальних температур, забезпечувати ступені деформації, які не приводять до зростання зерна оброблюваного матеріалу згідно з діаграмою рекристалізації. Взаємозв'язок між середніми розмірами зерен і механічними властивостями матеріалу після гарячої обробки тиском описують співвідношення Холла–Петча [5, 6], для теоретичного обґрунтування яких застосовують рівняння теорії зернограничного зміцнення, наведених, наприклад, в джерелі [6].

Виходячи з вищевикладеного, слід констатувати, що наявна методика вибору термомеханічних режимів кування і прогнозування механічних властивостей поковок є дуже неточною, що пов'язана з похибками візуального визначення ступеня і температури деформації по графіках. При цьому відомі роботи [7, 8], в яких для прогнозування механічних властивостей матеріалів після гарячої пластичної деформації використовували метод кліткових автоматів і нейромережеві моделі, що вимагають суттєвих затрат часу і машинних ресурсів для розрахунків. З цього погляду актуальним науково-практичним завданням є розробка швидкодійної методики апроксимації складних тривимірних графічних залежностей (діаграм рекристалізації) з оцінкою точності отримуваних математичних моделей.

Метою дослідження є розробка методики оброблення і аналізу масиву даних діаграм рекристалізації для точного вибору термомеханічних режимів гарячого пластичного деформування, які на стадії технологічного проектування забезпечать необхідні експлуатаційні властивості виробів, а також створення на основі отриманих математичних моделей, що описують зміну розмірів зерен матеріалу, прикладного програмного забезпечення.

Матеріали і результати дослідження

Рекристалізація є найпоширенішим процесом, що формує структуру металів і сплавів, а, відповідно, і їх структурно чутливі механічні і фізичні властивості [2]. Розділяють діаграми рекристалізації трьох типів, для яких графічно зображають залежність середнього розміру зерна від ступеня деформації і додаткових умов обробки матеріалу: для діаграм першого роду (холодна деформація) — від температури відпалу рекристалізації за однакової його тривалості у всіх випадках; для діаграм другого роду — від температури гарячої деформації без відпалу після деформації; для діаграм третього роду — від температури гарячої деформації і умов остаточної термічної обробки. Для проектування процесів кування використовують діаграми другого роду.

Середня площа зерна S залежить від температури t і ступеня деформації e , тобто: $S = f(t, e)$.

Знаючи площу S зерна, можна розрахувати його діаметр: $D = \sqrt{4 \cdot S / \pi}$. При цьому основними контрольованими механічними властивостями при здачі-прийомці металовиробів є: границя плинності σ_T , тимчасовий опір розриву σ_b , відносне подовження δ_5 , відносне звуження ψ і твердість за Віккерсом HV . Значення границі плинності σ_T і твердості за Віккерсом HV , пов'язані з діаметром зерна D співвідношеннями Холла–Петча [5–8]:

$$\sigma_T = \sigma_0 + k / \sqrt{D}; \quad (1)$$

$$HV = HV_0 + K / \sqrt{D}, \quad (2)$$

де σ_0 — напруження, що характеризує опір пластичній деформації з боку кристалічної ґратки; k — коефіцієнт, що характеризує вклад в зміцнення з боку границь зерен; HV_0 — твердість монокрystalу за Віккерсом; K — коефіцієнт, що характеризує твердість монокристалу.

Оскільки експериментальні дані, отримані при визначенні розміру зерна, за різних температур можуть мати відмінності, то доцільно провести інтерполяцію вихідних даних декількома методами, а потім вибрати той, який дає найменшу похибку.

Розробка методики апроксимації

Лінійна інтерполяція полягає в тому, що задані точки (x_i, y_i) ($i = 0, 1, \dots, n$) з'єднують відрізками прямої, і функція $f(x)$ наближається до ламаної з вершинами в певних точках [9]. Рівняння кожного відрізка ламаної лінії різні. Оскільки є n інтервалів (x_i, x_{i+1}) , то для кожного з них у якості рівняння інтерполяційного багаточлену використовують рівняння прямої, що проходить через дві точки. Зокрема, для i -го інтервалу можна записати рівняння прямої, що проходить через точки (x_i, y_i) і (x_{i+1}, y_{i+1}) , у вигляді:

$$\frac{y - y_i}{y_{i+1} - y_i} = \frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i}, \quad (3)$$

звідси:

$$y = a_i x + b_i; \quad x_i \leq x \leq x_{i+1}; \quad a_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}; \quad b_i = y_i - a_i x_i. \quad (4)$$

Таким чином, формула кусково-лінійної інтерполяції має вигляд:

$$f(x) = y_i \cdot \frac{x - x_{i+1}}{x_i - x_{i+1}} + y_{i+1} \cdot \frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i}. \quad (5)$$

Отже, використовуючи лінійну інтерполяцію, спочатку потрібно визначити інтервал, в який потрапляє значення аргументу x , а потім підставити його у формулу (5) і знайти наближене значення функцій в цій точці.

Квадратична інтерполяція. При квадратичній інтерполяції в якості інтерполяційної функція на відріжку (x_{i-1}, x_{i+1}) приймають квадратний тричлен [9]:

$$y = a_i x^2 + b_i x + c_i, \quad x_{i-1} \leq x \leq x_{i+1}. \quad (6)$$

Вираз (6) містить три невідомі коефіцієнти a_i , b_i , c_i , для визначення яких необхідно три рівняння, якими служать умови проходження параболи (6) через точки (x_{i-1}, y_{i-1}) , (x_i, y_i) і (x_{i+1}, y_{i+1}) . Ці умови записують у вигляді

$$\begin{cases} a_i x_{i-1}^2 + b_i x_{i-1} + c_i = y_{i-1}; \\ a_i x_i^2 + b_i x_i + c_i = y_i; \\ a_i x_{i+1}^2 + b_i x_{i+1} + c_i = y_{i+1}. \end{cases} \quad (7)$$

Інтерполяцію для будь-якої точки $x \in [x_0, x_n]$ проводять по трьох найближчих точках.

Кубічна сплайн-інтерполяція. У загальному випадку для функції $y = f(x)$ потрібно знайти наближення $y = j(x)$ таким чином, щоб $f(x_i) = j(x_i)$ в точках $x = x_i$, а в решті точок відріжку $[a, b]$ значення функцій $f(x)$ і $j(x)$ були близькими між собою. Кубічним інтерполяційним сплайном, відповідним певній функції $f(x)$ і певним вузлам x_i , називають функцію $S(x)$, що задовольняє таким умовам [9, 10]: а) на кожному сегменті $[x_{i-1}, x_i]$, $i = 1, 2, \dots, N$ функція $S(x)$ є поліномом третього ступеня; б) функція $S(x)$, а також її перша та друга похідні безперервні на відріжку $[a, b]$; в) $S(x_i) = f(x_i)$, $i = 0, 1, \dots, N$.

На кожному з відрізків $[x_{i-1}, x_i]$, $i = 1, 2, \dots, N$ шукали функцію $S(x) = S_i(x)$ у вигляді полінома третього ступеня:

$$S_i(x) = a_i + b_i(x - x_{i-1}) + c_i(x - x_{i-1})^2 + d_i(x - x_{i-1})^3; \quad x_{i-1} \leq x \leq x_i, \quad (8)$$

де a_i , b_i , c_i , d_i — коефіцієнти, що підлягають визначенню на всіх n елементарних відрізках.

Щоб система алгебраїчних рівнянь мала розв'язок, потрібно, щоби кількість рівнянь дорівнювала числу невідомих. Тому потрібно отримати $(4n)$ рівняння.

Перші $(2n)$ рівняння отримують з умови, що графік функції $S(x)$ повинен проходити через задані точки, тобто $S_i(x_{i-1}) = y_{i-1}$, $S_i(x_i) = y_i$. Ці умови записують у вигляді

$$S_i(x_{i-1}) = a_i = y_{i-1}; \quad (9)$$

$$S_i(x_i) = a_i + b_i h_i + c_i h_i^2 + d_i h_i^3 = y_i, \quad (10)$$

де $h_i = x_i - x_{i-1}$, $i = 1, 2, \dots, n$.

Наступні $(2n - 2)$ рівняння випливають з умови безперервності перших і других похідних у вузлах інтерполяції, тобто умови гладкості кривої в усіх точках [10]. Після перетворень, виконаних згідно з теорією сплайнів [9, 10], остаточно отримують систему рівнянь для коефіцієнтів c_i ($c_1 = 0$; $c_{n+1} = 0$):

$$h_{i-1} c_{i-1} + 2(h_{i-1} + h_i) c_i + h_i c_{i+1} = 3 \left(\frac{y_i - y_{i-1}}{h_i} - \frac{y_{i-1} - y_{i-2}}{h_{i-1}} \right). \quad (11)$$

За знайденими коефіцієнтами c_i обчислюють d_i і b_i [10—12]:

$$d_i = (c_{i+1} - c_i) / 3h_i, \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad d_n = -c_n / 3h_n; \quad (12)$$

$$b_i = \frac{y_i - y_{i-1}}{h_i} - \frac{h_i}{3} (c_{i+1} + 2c_i), \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad b_n = \frac{y_n - y_{n-1}}{h_n} - \frac{3}{2} (h_n c_n). \quad (13)$$

Глобальна інтерполяція. Класичний підхід ґрунтується на вимозі строгого збігу значень $f(x)$ і $\phi(x)$ у точках x_i ($i = 0, 1, \dots, n$) [9, 10]. Шукатимемо інтерполяційну функцію $\phi(x)$ у вигляді полінома ступеня n . Цей поліном має $n + 1$ коефіцієнтів. При цьому маємо $n + 1$ умов:

$$\phi(x_0) = y_0; \quad \phi(x_1) = y_1; \quad \phi(x_n) = y_n. \quad (14)$$

Умови (14) накладаються на поліном

$$\phi(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0. \quad (15)$$

Таким чином, можна однозначно визначити коефіцієнти полінома (15). Вимагаючи для $\phi(x)$ виконання умов (14), отримуємо систему $n + 1$ рівнянь з $n + 1$ невідомими:

$$\sum_{k=0}^n a_k x_i^k = y_i \quad (i = 0, 1, \dots, n). \quad (16)$$

Розв'язуючи цю систему відносно невідомих a_0, a_1, \dots, a_n , отримуємо аналітичний вираз полінома (15). Система (16) має єдине рішення, оскільки її визначник запишеться у вигляді

$$\Delta = \begin{vmatrix} x_0^n & x_0^{n-1} & x_0 & \dots & 1 \\ x_1^n & x_1^{n-1} & x_1 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 1 \\ x_n^n & x_n^{n-1} & x_n & \dots & 1 \end{vmatrix}. \quad (17)$$

Визначник Вандермонда (17) є відмінним від нуля. Отже, інтерполяційний поліном $\phi(x)$ для функції $f(x)$, заданої таблицею, існує і єдиний.

Апроксимація результатів для отримання розрахункових залежностей

Для отримання аналітичних виразів для розрахунку показників механічних властивостей за заданих умов гарячої деформації використовували стандартні методи апроксимації даних [9—11]: метод найменших квадратів і метод перебору. В якості моделі рівнянь регресії в методі найменших квадратів використовували: лінійну модель, експоненціальну модель, квадратичну модель, степеневу модель і кубічну модель. Методом перебору за аргументом знаходили коефіцієнти

рівнянь регресії, за яких мінімальне відхилення [11] $\Delta = \sum_{i=1}^n (y_i^p - y_i)^2 / n$, де n — кількість пар

експериментальних даних; y_i і y_i^p — задані і розрахункові значення, відповідно. При ітеративних обчисленнях розрахунки припиняють після досягнення заданої різниці між значеннями коефіцієнтів рівнянь регресії на сусідніх ітераціях.

Програмне забезпечення і аналіз результатів дослідження

На підставі вказаних методик апроксимації розроблено програмне забезпечення в пакеті Borland C++ Builder 4 (програма «Recrystallization»). З натисненням на заставку програми відкривається вкладка «Исходные данные» (рис. 1). У лівій частині вікна наведено приклад типової діаграми рекристалізації низьковуглецевої сталі, а в правій частині вікна — таблиця даних діаграми. Для введення і редагування вихідних даних використовують панель навігації, розташовану в правому нижньому кутку вікна. Для розрахунку розміру зерна натискають кнопку «Перейти к расчету размеров зерна», яка розташована під таблицею вихідних даних.

Вкладка «Расчет размеров зерна» показана на рис. 2.

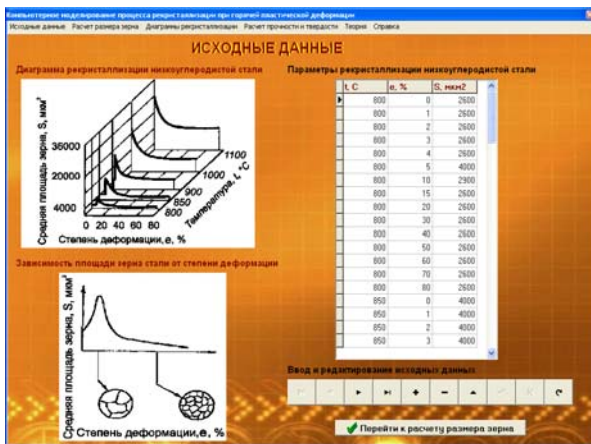


Рис. 1. Вкладка «Вихідні дані»

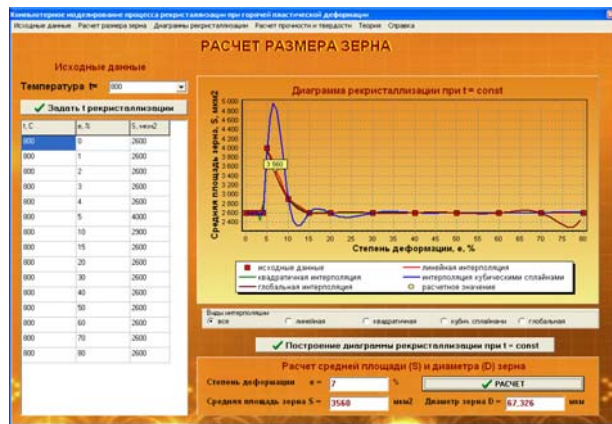


Рис. 2. Вкладка «Розрахунок розміру зерна», побудова діаграми рекристалізації за $t = 800$ °C і розрахунок розміру зерна, якщо $e = 7$ %

Як приклад задамо дані діаграми рекристалізації за рис. 1 і виконаємо їх аналіз для температури рекристалізації $t = 800$ °C. Користувач може вибрати один або всі види інтерполяції. За температури $t = 800$ °C діаграму рекристалізації (див. рис. 2) можна умовно розбити на 4 ділянки: 1) зі ступенем деформації від 0 до 4 % — лінійна ділянка, що характеризується постійною площею зерна; 2) зі ступенем деформації від 4 до 5 % — різке зростання площі зерна; 3) зі ступенем деформації від 5 до 15 % — експоненціальне зменшення площі зерна; 4) зі ступенем деформації від 15 до 80 % — лінійна ділянка, що характеризується постійною площею зерна.

Найточнішою (у всіх випадках) є лінійна інтерполяція, оскільки для заданого числа ділянок розбиття заміна відрізків кривій прямолінійними зв'язаними ділянками дає ламану, близьку до передбачуваної кривої. Зі ступенем деформації $e = 4$ —5 % спостерігається різке зростання площі зерна, а потім її поступове зменшення, тому спостерігається осциляція при квадратичній інтерполяції в околі $e = 4$ %, а при інтерполяції кубічними сплайнами — на ділянці $e = 5$ —30 %, при глобальній інтерполяції — на ділянці $e = 60$ —80 %.

В результаті розрахунків за $t = 800$ °C і $e = 7$ % маємо: середня площа зерна $S = 3560$ мкм², діаметр зерна $D = 67,326$ мкм (див. рис. 2). Аналогічний аналіз можна провести для будь-якої температури і ступеня деформації, в межах, позначених діаграмою. Наприклад, при $e = 7$ % розраховували площу і діаметр зерна для інших температур: за $t = 850$ °C — $S = 9520$ мкм², $D = 110,1$ мкм; за $t = 900$ °C — $S = 12920$ мкм², $D = 128,26$ мкм; за $t = 1000$ °C — $S = 16104$ мкм², $D = 143,19$ мкм; за $t = 1100$ °C — $S = 18100$ мкм², $D = 151,81$ мкм. Таким чином, із заданим ступенем деформації $e = 7$ % зі збільшенням температури збільшуються розміри зерна.

Вкладка «Діаграми рекристалізації» (рис. 3) містить побудовані діаграми рекристалізації для визначення середнього розміру (S) і діаметра зерна (D) за різних температур (t) і ступенів деформації (e). Користувач може відображати криві за вибором і оцінювати діапазон зміни розмірів зерна.

Вкладка «Расчет прочности и твердости» (рис. 4) містить розрахунок границі плинності ($G_T = \sigma_T$) і твердості за Віккерсом (HV) із заданим діаметром зерна (D). На вкладці відображається діаметр зерна, заздалегідь розрахований для заданих t і e на вкладці «Расчет размеров зерна» (див. рис. 2). Для розрахунку границі плинності G_T за формулою Холла–Петча необхідно натиснути на кнопку «Расчет по формуле Холла–Петча». У формі, що з'явилася, задають константи: $G_0 = \sigma_0$ і $K = k$, див. формулу (1), а потім натискають кнопку «Перейти к расчетам». Для розрахунку твердості (HV) за формулою Холла–Петча задають константи: $HV_0 = HV_0$ і K , див. формулу (2), а потім натискають кнопку «Перейти к расчетам».

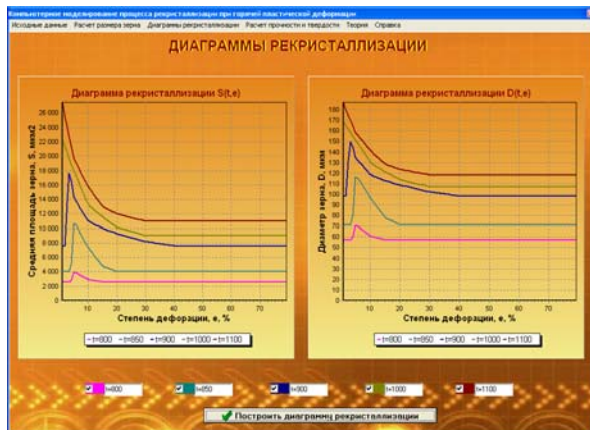


Рис. 3. Вкладка «Діаграми рекристалізації»

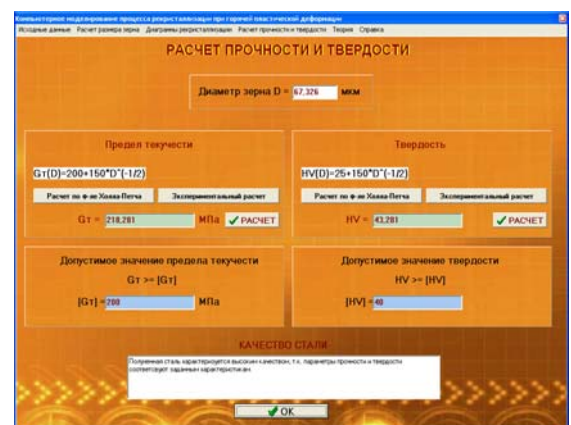


Рис. 4. Вкладка «Розрахунок міцності і твердості», розрахунок $G_T = \sigma_T$ і HV з діаметром зерна $D = 67,326$ мкм за використання формули Холла–Петча

Для діаметра зерна $D = 67,326$ мкм ($t = 800$ °C та $e = 7$ %) і констант, заданих на основі літературних джерел [5, 6], границя плинності дорівнює $G_T = 218$ МПа, а твердість за Віккерсом — $HV = 43$ (див. рис. 4). Порівняння набутих значень з мінімально допустимими $[G_T] = 200$ МПа і $[HV] = 40$ для низьковуглецевих сталей, показало, що отримана сталь після вказаних термомеханічних режимів деформаційного опрацювання характеризується високою якістю, оскільки виконуються співвідношення: $G_T \geq [G_T]$ і $HV \geq [HV]$.

Користувач може самостійно вибирати тип апроксимуючої залежності, а може натисненням кнопки «Найкраща апроксимація» вибрати апроксимуючу залежність, для якої величина середньоквадратичної помилки δ мінімальна.

В результаті проведення апроксимації отримано такі залежності для розрахунку границі плинності:

— лінійна апроксимація

$$G_T = -0,115D + 224,626; \quad \delta = 0,8930; \quad (18)$$

— квадратична апроксимація

$$G_T = 0,001D^2 - 0,224D + 231,681; \quad \delta = 0,1651; \quad (19)$$

— кубічна апроксимація

$$G_T = 0,000001D^3 + 0,0024D^2 - 0,412D + 234,652; \quad \delta = 0,1093; \quad (20)$$

— експоненціальна апроксимація

$$G_T = 2,638 \cdot \exp(0,049D); \quad \delta = 829,3703; \quad (21)$$

— степенева апроксимація

$$G_T = 1,313D^{1,124}; \quad \delta = 238,9619; \quad (22)$$

— зворотна апроксимація за формулою Холла–Петча

$$G_T = 195,7 + 166,62D^{-1/2}; \quad \delta = 0,1720. \quad (23)$$

В результаті проведених розрахунків визначено, що найкращою апроксимуючою моделлю для вказаного прикладу є кубічна залежність, оскільки для неї величина середньоквадратичної помилки мінімальна і складає $\delta = 0,1093$. Для порівняння, середньоквадратична помилка для розрахунку за формулою Холла–Петча дорівнює $\delta = 0,1720$, тобто відрізняється незначно.

Аналогічно проводиться апроксимація даних для визначення залежності твердості за Віккерсом HV від діаметра зерна D . Визначено, що найкращою апроксимуючою залежністю в цьому випадку є кубічна залежність, оскільки для неї величина середньоквадратичної помилки мінімальна і складає $\delta = 0,1954$. Також можна скористатися кнопкою «Наилучшая аппроксимация», і програма автоматично вибере найкращу апроксимуючу залежність зі списку запропонованих.

Висновки

Розроблена автоматизована методика апроксимації діаграм рекристалізації для проектного або оперативного вибору термомеханічних режимів кування, що забезпечують високі експлуатаційні властивості поковок валів. Складено прикладне програмне забезпечення, що дозволяє обробляти дані діаграм рекристалізації, отримані в результаті власних дослідів або узяті з технічної літератури, і розраховувати середні розміри зерна та прогнозувати механічні властивості (границю пластичності і твердість за Віккерсом) матеріалу для заданих термомеханічних режимів обробки тиском. На прикладі показані можливості розробки, що дозволяють пропонувати розрахункові залежності для визначення значень механічних властивостей поковок для заданих термомеханічних режимів, визначати точність апроксимуючих моделей і оцінювати якість металу поковок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Технологія кування / Л. М. Соколов, І. С. Алієв, О. Є. Марков, Л. І. Алієва. — Краматорськ : ДДМА, 2011. — 268 с.
2. Горелик С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов / С. С. Горелик. — М. : Металлургия, 1978. — 568 с.
3. Тюрин В. А. Инновационные технологииковки с применением макросдвигов / В. А. Тюрин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. — 2007. — № 11. — С. 15—20.
4. Кухарь В. В. Технологическая реализация макросдвиговых деформаций при ковке поковок валов без усложнения конструкции инструмента / В. В. Кухарь, О. В. Василевский, А. В. Грушко // Металлургические процессы и оборудование. — Июнь, 2014. — № 2 (36). — С. 12—18.
5. Особенности морфологии и прочность конструкционных сталей / С. А. Беженев, В. Ю. Коцюба, С. Н. Пахолка [и др.] // Вестник двигателестроения. — 2009. — № 2. — С. 133—138.
6. Роль границ зерен в радиационном упрочнении и охрупчивании материалов / Н. А. Азаренков, С. В. Литовченко, Л. С. Ожигов, А. А. Пархоменко. — Харьков : ХНУ им. В.Н. Каразина, 2008. — 64 с.
7. Борисовская Е. М. Моделирование зависимости предела текучести от размера зерна методом клеточных автоматов / Е. М. Борисовская // Электронная микроскопия и прочность материалов : сб. научн. тр. Сер. : Физическое материаловедение, структура и свойства материалов. — К. : ИПМ НАН України, 2010. — Вип. 17. — С. 23—28.
8. Образцов С. М. Нейросетевые модели эволюции физико-механических свойств конструкционных материалов ядерных реакторов : автореф. дис. на соискание степени д-ра физ.-мат. наук : спец. 05.13.18 / Образцов Сергей Михайлович. — Обнинск, 2011. — 34 с.
9. Денисова Э. В. Основы вычислительной математики / Э. В. Денисова, А. В. Кучер. — СПб : ИТМО, 2010. — 164 с.
10. Де Бор К. Практическое руководство по сплайнам / К. Де Бор. — М. : Радио и связь, 1985. — 235 с.
11. Петросян В. Г. Методы перебора в решении физических задач / В. Г. Петросян, Т. В. Петросян // Информатика и образование. — 1996. — № 3. — С. 73—83.

Рекомендована кафедрою опору матеріалів та прикладної механіки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 13.11.2014

Кухар Володимир Володимирович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри обробки металів тиском, e-mail: kvv_mariupol@mail.ru;

Тузенко Ольга Олександрівна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформатики, e-mail: tuzenko00a@gmail.com;

Балалаєва Олена Юрївна — канд. техн. наук, старший викладач кафедри інформатики, e-mail: balalaevaou@gmail.com.

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Маріуполь;

Василевський Олег Вікторович — головний технолог, e-mail: kovka-vas.oleg@yandex.ua.

ТОВ «Метінвест—Маріупольський ремонтно-механічний завод», Маріуполь

V. V. Kukhar¹
O. O. Tuzenko¹
O. Yu. Balalayeua¹
O. V. Vasylevskiy²

Development of the automated methodology of approximation of recrystallization curves for the choice of the thermomechanical modes of forging improving the operating properties of shaft forging

¹State Higher Educational Institution “Pryazovskyi State Technical University”

²Company Ltd. “Metinvest — Mariupol Mechanical-Repair Plant”

The automated methodology of approximation of difficult three-dimensional diagrams of recrystallization is developed and the application program allowing in the project or operative mode to determine the size and mechanical properties of material grain at the set of thermomechanical modes of shaft forging and estimate their operating durability and indestructibility is carried out.

Keywords: diagram of recrystallization, approximation, grain size, mechanical properties, shaft forgings.

Kukhar Volodymyr V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Metal Forming, e-mail: kvv_mariupol@mail.ru;

Tuzhenko Olha O. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Informatics, e-mail: tuzenkoaa@gmail.com;

Balalayeua Olena Yu. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Informatics, e-mail: balalayeuaeu@gmail.com;

Vasylevskiy Oleg V. — Chief Industrial Engineer, e-mail: kovka-vas.oleg@yandex.ua.

В. В. Кухарь¹
О. А. Тузенко¹
Е. Ю. Балалаева¹
О. В. Василевский²

Разработка автоматизированной методики аппроксимации диаграмм рекристаллизации для выбора термомеханических режимов ковки повышающих эксплуатационные свойства поковок валов

¹ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет»;

²ООО «Метинвест — Мариупольский ремонтно-механический завод»

Разработана автоматизированная методика аппроксимации сложных трехмерных диаграмм рекристаллизации и составлена прикладная программа, позволяющая в проектном или оперативном режиме определять размеры зерна и механические свойства материала при заданных термомеханических режимах ковки поковок валов и оценить их эксплуатационную прочность и долговечность.

Ключевые слова: диаграмма рекристаллизации, аппроксимация, размер зерна, механические свойства, поковки валов

Кухарь Владимир Валентинович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением, e-mail: kvv_mariupol@mail.ru;

Тузенко Ольга Александровна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информатики, e-mail: tuzenkoaa@gmail.com;

Балалаева Елена Юрьевна — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры информатики, e-mail: balalayeuaeu@gmail.com;

Василевский Олег Викторович — главный технолог, e-mail: kovka-vas.oleg@yandex.ua