

УДК 621.73

Л.О. Рябічева, Д.А. Усатюк

Східноукраїнський національний університет
імені Володимира Даля

ЗАСТОСУВАННЯ ФУНКЦІЇ ТЕРМОМЕХАНІЧНОГО ЗМІЦНЕННЯ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ПАРАМЕТРІВ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПОКОВОК ТА ШТАМПІВ МЕТОДОМ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

До пружно-пластичної моделі матеріалу введена удосконалена функція термомеханічного зміцнення. Запропонована методика забезпечує одноманітний підхід до визначення впливу температурно-швидкісних умов деформування на механічні властивості матеріалів поковки та штампа при гарячому штампуванні.

В упругопластическую модель материала введена усовершенствованная функция термомеханического упрочнения. Предложенная методика обеспечивает единообразный подход к определению влияния температурно-скоростных условий деформирования на механические свойства материалов поковки и штампов при горячей штамповке.

The enhanced function of thermo-mechanical hardening is implemented into elasto-plastic model of material. The proposed technique ensures a universal approach to determination of the influence of temperature and strain rate conditions to mechanical properties of materials of forged pieces and dies at hot forging.

Механічні властивості сталей залежать від температури, швидкості та ступеню деформації, причому процеси зміцнення та знеміцнення, викликані зміною ступеню і швидко-

сті деформації та температури, мають різну природу. Для гарячого об'ємного штампування на молотах притаманні високі швидкості деформації, тому зменшення внаслідок підвищення температури частково компенсується швидкісним та деформаційним зміцненням [1, 2]. Визначення механічних властивостей металу для відомих температурно-швидкісних умов деформування при об'ємному штампуванні виконується методом термомеханічних коефіцієнтів (МТК) згідно до методики, викладеної в роботі [3].

В роботі [1] є експериментальні залежності k_t , k_ε і $k_{\dot{\varepsilon}}$ для різних сталей і сплавів. Для використання цих даних у скінчено-елементному аналізі необхідна їх апроксимація ступеневими, логарифмічними та показовими функціями з визначенням коефіцієнтів за методом найменших квадратів для кожного з матеріалів:

$$k_t(t) = C_1 t^{C_2}, k_\varepsilon(\varepsilon_i) = C_5 \ln(\varepsilon_i) + C_6, k_{\dot{\varepsilon}}(\dot{\varepsilon}_i) = C_3 \exp^{C_4 \dot{\varepsilon}_i}, \quad (1)$$

де $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ – коефіцієнти, що залежать від матеріалу;

t – температура металу;

ε_i – інтенсивність деформацій.

Для визначення коефіцієнтів у формулах (1) запишемо нормальні рівняння методу найменших квадратів за способом Гауса, згідно до якого:

$$\sum_{i=1}^N f(x_i) = [f(x_i)], \quad (2)$$

де $f(x_i)$ – експериментальна залежність,

N – число експериментальних точок.

В такому випадку вирази шуканих коефіцієнтів мають вигляд:

$$\begin{aligned}
C_1 &= \frac{[k_t][t^2] - [k_t t][t]}{N[t^2] - ([t])^2}, & C_2 &= \frac{N[k_t t] - [k_t][t]}{N[t^2] - ([t])^2}, \\
C_3 &= \frac{[k_\varepsilon][\varepsilon^2] - [k_\varepsilon \varepsilon][\varepsilon]}{N[\varepsilon^2] - ([\varepsilon])^2}, & C_4 &= \frac{N[k_\varepsilon \varepsilon] - [k_\varepsilon][\varepsilon]}{N[\varepsilon^2] - ([\varepsilon])^2}, \\
C_5 &= \frac{[k_{\dot{\varepsilon}}][\dot{\varepsilon}^2] - [k_{\dot{\varepsilon}} \dot{\varepsilon}][\dot{\varepsilon}]}{N[\dot{\varepsilon}^2] - ([\dot{\varepsilon}])^2}, & C_6 &= \frac{N[k_{\dot{\varepsilon}} \dot{\varepsilon}] - [k_{\dot{\varepsilon}}][\dot{\varepsilon}]}{N[\dot{\varepsilon}^2] - ([\dot{\varepsilon}])^2}.
\end{aligned} \quad (3)$$

Функції (1) забезпечують мінімум суми квадратів відхилень експериментальних та розрахункових величин згідно до умови збіжності методу найменших квадратів.

$$S_R = \sum_{i=1}^N (f(x_i) - y(x_i)) \leq S_R^{\min}, \quad (4)$$

Для використання МТК у скінчено-елементному аналізі на основі формул (1) побудуємо функцію термомеханічного зміцнення:

$$\Omega(t, \varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i) = k_t(t)k_\varepsilon(\varepsilon_i)k_{\dot{\varepsilon}}(\dot{\varepsilon}_i), \quad (5)$$

де $k_t(t)$ – функція температурного зміцнення;

$k_\varepsilon(\varepsilon_i)$ – функція деформаційного зміцнення;

$k_{\dot{\varepsilon}}(\dot{\varepsilon}_i)$ – функція швидкісного зміцнення.

Значення коефіцієнтів апроксимації для сталі 45Х, обчислені за формулами (3), наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Коефіцієнти апроксимації для сталі 45Х

Марка сталі	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
Сталь 45Х	$9,2 \cdot 10^8$	3	32	0,15	1,02	0,002

Після підстановки коефіцієнтів з табл. 1 до формул (1) отримаємо термомеханічні функції для сталі 45Х:

$$\begin{aligned} k_t(t) &= 9,2 \cdot 10^8 t^{-3}, \\ k_\varepsilon(\varepsilon) &= 0,32 \ln(\varepsilon) + 0,15, \\ k_{\dot{\varepsilon}}(\dot{\varepsilon}) &= 1,02 \exp^{0,002 \dot{\varepsilon}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Матеріал штампу працює у пружній області, тому величини деформацій не перевищують умовної межі текучості. Штампова сталь піддається переважно швидкісному зміцненню, тому що через малі величини деформацій, швидкості деформацій при роботі молотових штамсів знаходяться у межах $100-300 \text{ с}^{-1}$, а температурне зміцнення починається тільки при локальному перегріві вище температури фазових перетворень. Згідно до положень динамічної деформаційної теорії пластичності динамічна умовна межа текучості σ_{02}^{din} штампових сталей змінюється за ступеневим законом [10]:

$$\sigma_{02}^{din} = \sigma_{02} \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i}{D} \right)^{1/n} \right], \quad (7)$$

де σ_{02} – умовна межа текучості;

$\dot{\varepsilon}_i$ – інтенсивність швидкостей деформації в штампі;

D – розмірний коефіцієнт швидкісної чутливості, с^{-1} ;

n – безрозмірний коефіцієнт швидкісної чутливості.

Оскільки розмірності $\dot{\varepsilon}_i$ та D співпадають, то вираз (4) перетворимо наступним чином:

$$\sigma_{02}^{din} = \sigma_{02} k_{\dot{\varepsilon}}(\dot{\varepsilon}_i), \quad (8)$$

де $k_{\dot{\varepsilon}}(\dot{\varepsilon}_i)$ – функція швидкісного зміцнення штампової стали:

$$k_{\dot{\varepsilon}}(\dot{\varepsilon}_i) = 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i}{D} \right)^{1/n} . \quad (9)$$

Залежності $k_t(t)$, $k_{\dot{\varepsilon}}(\dot{\varepsilon})$ і $k_{\varepsilon}(\varepsilon)$ сталі 45Х, визначені за формулою (6), наведені на рис. 1 а – рис. 1 в. Експериментальні дані з роботи [1] щодо кожної з залежностей нанесені у вигляді точок. Залежність $k_{\dot{\varepsilon}}(\dot{\varepsilon})$ сталі 5ХНМ, визначена за формулою (9) на основі даних роботи [4], показана на рис. 1 г.

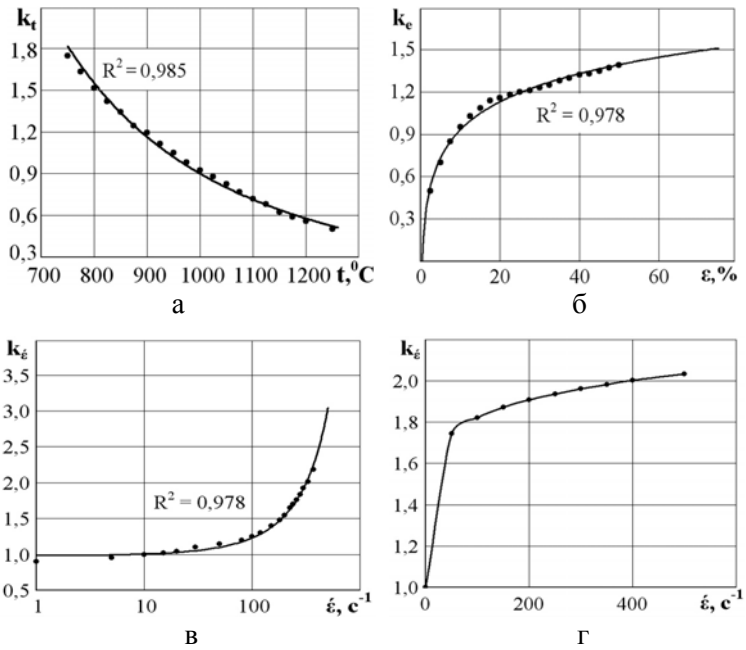


Рис. 1. Термомеханічні функції: а - $k_t = f(t)$;

б - $k_{\varepsilon} = f(\varepsilon)$; в - $k_{\dot{\varepsilon}} = f(\dot{\varepsilon})$; г - $k_{\dot{\varepsilon}} = f(\dot{\varepsilon})$ для штампу

Оскільки впливом ступеню деформації та температури на властивості штампової сталі можна знехтувати, то функції, що характеризують вплив деформації та температури на

властивості, представимо як одиничні функції: $k_\varepsilon(\varepsilon_i) = 1$, $k_t(t) = 1$. Завдяки цьому функція термомеханічного зміцнення (3) залишається справедливою і для матеріалу штампа, а формула для динамічної умовної межі текучості набуває наступного вигляду:

$$\sigma_{02}^{din} = \sigma_{02} \Omega(t, \varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i). \quad (10)$$

Таким чином, введенням функції термомеханічного зміцнення до пружно-пластичної моделі матеріалу встановлено одноманітний підхід до урахування впливу процесів зміцнення та знеміцнення різної природи на механічні властивості матеріалів поковки і штампу при скінченно-елементному аналізі процесів гарячого штампування. Функція термомеханічного зміцнення дозволяє визначати параметри напружено-деформованого стану на кожному кроці розрахунків з урахуванням температурно-швидкісних умов деформування.

Литература

1. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением.- М.: Металлургия, 1973. 224 с.
2. Довнар С.А. Термомеханика упрочнения и разрушения штампов объемной штамповки - М.: Машиностроение, 1975. – 255 с.
3. Рябичева Л.А., Усатюк Д.А. Применение метода термомеханических коэффициентов к анализу напряженно-деформированного состояния при горячей осадке // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім.В.Даля.–2006. №6(100).Ч.1.– с.45-49.
4. Колодяжний А.В., Севрюков В.И. Ударные и импульсные воздействия на конструкции и материалы. Киев: Наук. думка, 1986. – 168 с.