пособие. – Волгоград: ВПИ, 1984. – 77 с. **11.** Исследование свариваемости взрывом, структуры и свойств медно-алюминиевого биметалла / *С.В. Кузьмин, В.И. Лысак, А.П. Пеев* // Изв. ВолгГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2006. – Вып.2, №9. - С. 37-45.

УДК 621.77

МИХАЛЕВИЧ В. М., докт. техн. наук, проф., ВНТУ, Вінниця
КРАЄВСЬКИЙ В. О., канд. техн. наук, доц., ВНТУ, Вінниця

ОПТИМІЗАЦІЯ ГАРЯЧОГО ЦИКЛІЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ІЗ ПАУЗАМИ

В работе сформулирована и решена задача определения параметров горячего циклического деформирования с паузами, при которых за заданное время материал получает наибольшую деформацию. Проведен сравнительный анализ результатов оптимизации с известными экспериментальными данными деформирования с постоянной скоростью.

У роботі сформульована та розв'язана задача визначення параметрів гарячого циклічного деформування із паузами, при яких за заданий час матеріал здобуває найбільшу деформацію. Проведений порівняльний аналіз результатів оптимізації із відомими експериментальними даними деформування із сталою швидкістю.

In the work the problem of definition of parametres of hot cyclic deformation with pauses at which the material receives the greatest deformation for set time is formulated and solved. The comparative analysis of optimisation results with known experimental data of deformation with constant speed is carried out.

У роботі [1] сформульована задача визначення оптимального режиму гарячого пластичного деформування, при якому за заданий час t_* матеріал здобуває без руйнування найбільшу деформацію ε_*

$$\varepsilon_* = \int_0^{t_*} \dot{\varepsilon}_u(\tau)\cdot d\tau \to \max,$$
$$\begin{cases} \int_0^{t_*} \varphi(t_* - \tau; I(\tau))\cdot f(\dot{\varepsilon}_u(\tau))\cdot d\tau = 1, \\ \int_0^{t} \varphi(t - \tau; I(\tau))\cdot f(\dot{\varepsilon}_u(\tau))\cdot d\tau \le 1,\ \forall t \in (0, t_*), \end{cases} \tag{1}$$

де t, τ – час; $\varphi(t-\tau, I(\tau))$ – ядро спадковості; f – деяка функція; $\dot{\varepsilon}_u(\tau)$ – швидкість деформування.

При розв'язанні задачі (1) в області неперервних функцій виникли труднощі із врахуванням останньої умови [2]. Тому надалі розв'язок шукався в області кусково-сталих функцій. На основі існування розв'язку для двоетапної зміни швидкості деформування зроблено висновок, що шуканий розв'язок задачі (1) відноситься до класу деформування із змінною швидкістю [3]. У роботі [4] досліджено процес гарячого деформування із паузами і відмічено, що під час паузи відбувається відновлення пластичності матеріалу. Модель накопичення пошкоджень спадкового типу що використовується в математичній формалізації задачі (1) описує даний ефект [4]. Очевидно, що можна спробувати використати ефект відновлення пластичності матеріалу під час паузи для оптимізації процесу гарячого деформування.

$$\psi(t) = \int_0^t \varphi(t-\tau; I(\tau)) \cdot f(\dot{\varepsilon}_u(\tau)) \cdot d\tau, \qquad (2)$$

Мета даної роботи визначити оптимальний режим гарячого циклічного деформування із паузами, при якому за заданий час матеріал здобуває найбільшу деформацію.

Зміна швидкості $\dot{\varepsilon}_u(t)$ при застосуванні циклічного режиму деформування із паузами, що складається із k повних циклів і одного неповного тривалістю t_k, визначається як

$$\dot{\varepsilon}_u(t) = \begin{cases} \dot{\varepsilon}_u,\ 0 \le t \le t_н, \\ 0,\ t_н \le t \le t_н + t_п, \\ \ldots \\ \dot{\varepsilon}_u,\ (i-1)t_н + (i-1)t_п \le t \le it_н + (i-1)t_п, \\ 0,\ it_н + (i-1)t_п \le t \le it_н + it_п, \\ \ldots \\ \dot{\varepsilon}_u, t_* - t_k \le t \le t_*, \end{cases} \qquad (3)$$

де $t_н$, t_k – час деформування із швидкістю $\dot{\varepsilon}_u$, $t_п$ – час паузи, $i = \overline{1,k}$.

При цьому накопичення пошкоджень у матеріалі відбувається за законом

$$\psi(t) = \begin{cases} \dfrac{\dot{\varepsilon}_u}{a^n} \cdot t^n, t \le t_н; \\ \dfrac{\dot{\varepsilon}_u}{a^n} \cdot (t - t_н), t_н < t \le t_н + t_п; \\ \dfrac{\dot{\varepsilon}_u}{a^n} \left[\sum_{i=1}^{j} \left[(t - (i-1) \cdot (t_н + t_п))^n - (x - it_н - (i-1) \cdot t_п)^n \right] + \right. \\ \left. + (t - j \cdot (t_н + t_п))^n \right], j \ge 1, t - j(t_н + t_п) \le t_н; \\ \dfrac{\dot{\varepsilon}_u}{a^n} \left[\sum_{i=1}^{j} \left[(t - (i-1) \cdot (t_н + t_п))^n - (x - it_н - (i-1) \cdot t_п)^n \right] + \right. \\ \left. + (t - j \cdot (t_н + t_п))^n - (x - j \cdot (t_н + t_п) - t_н)^n \right], j \ge 1, t - j(t_н + t_п) \ge t_н, \end{cases} \qquad (4)$$

де $j = ціле\left\{\dfrac{t}{t_н + t_п}\right\}$; a, n – параметри матеріалу при заданих умовах деформування.

Із врахування (3) і (4) задача (1) набуде вигляду

$$
\begin{aligned}
&\varepsilon_* = k \cdot t_{н} \cdot \dot{\varepsilon}_u + t_k \cdot \dot{\varepsilon}_u \to \max,\\
&\frac{\dot{\varepsilon}_u}{a^n}\sum_{i=1}^{k}\Big[\big((k-i+1)(t_{н}+t_n)+t_k\big)^n - \big((k-i)(t_{н}+t_n)+t_n+t_k\big)^n\Big] + t_k^n = 1,\\
&\frac{\dot{\varepsilon}_u}{a^n}\sum_{i=1}^{k}\Big[\big((k-i)(t_{н}+t_n)+t_{н}\big)^n - (k-i)^n(t_{н}+t_n)^n\Big] + t_k^n \le 1,\\
&0 \le t_k \le t_{н},\\
&0 \le t_{н} \le \frac{t_*}{k},\\
&0 \le t_n \le \frac{t_*}{k} - t_{н}.
\end{aligned}
\qquad (5)
$$

де при заданій кількості повних етапів k цільова функція ε_* залежить від чотирьох параметрів $\dot{\varepsilon}_u$, $t_{н}$, t_n, t_k.

Врахувавши, що

$$t_* = kt_{н} + kt_n + t_k \qquad (6)$$

і визначивши із першої умови (5) $\dot{\varepsilon}_u$ отримаємо задачу знаходження екстремуму функції двох змінних

$$\varepsilon_*(t_{н}, t_n) = \frac{a^n(t_* - k \cdot t_n)}{\sum\limits_{i=1}^{k}\Big[\big((k-i+1)(t_{н}+t_n)+t_k\big)^n - \big((k-i)(t_{н}+t_n)+t_n+t_k\big)^n\Big] + t_k^n}. \qquad (7)$$

Для даної функції отримали нескінченну множину критичних точок

$$t_{н} = t_{н}; t_n = 0. \qquad (8)$$

які відповідають режиму деформування із стаціонарною швидкістю. Так як

$$\left.\frac{\partial^2 f}{\partial t_{н}^2} \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial t_n^2} - \left(\frac{\partial^2 f}{\partial t_{н}\partial t_n}\right)^2\right|_{(t_{н},0)} = -\left(a^n t_*^{1-2n}(n^2-n)\sum_{i=1}^{k} i(t_* - it_{н})^{n-2}\right)^2 < 0. \qquad (9)$$

функція (7) екстремумів не має, тому максимальне її значення знаходиться лише на границі області, що визначається нерівностями задачі (5).

Розглянемо експериментальні дані неперервного кручення зразків із сталі 14Х17Н2 при температурі 1150^{0}С [5]. Загальний вигляд функції (7) для даного матеріалу зображений на рис. 1.

При деформуванні із постійною швидкістю максимальна деформація $\varepsilon_* = 1.8$. Розв'язавши задачу (5) за допомогою MathCad-функції Maximize, отримали такі параметри оптимальної схеми циклічного деформування із паузами:

$$t_{н} = 1.778\,c, t_n = 1.194c, t_k = 0.284c, \dot{\varepsilon}_u = 0.1c^{-1}. \qquad (10)$$

Максимальна деформація, яку здобуває матеріал без руйнування із застосуванням схеми (10) $\varepsilon_* = 1.809$. Тобто спостерігається незначне збільшення максимальної деформації у порівнянні із деформуванням із сталою швидкістю, але яке, очевидно, не

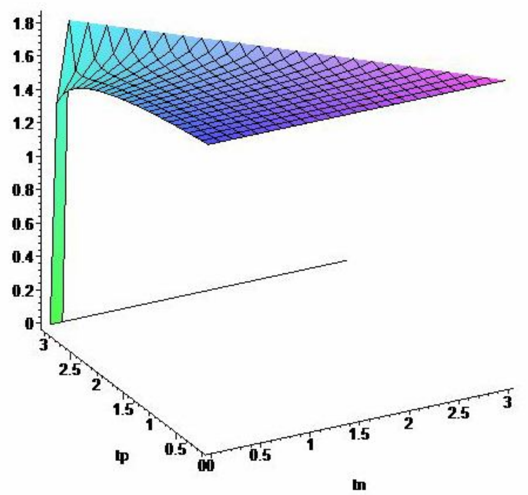
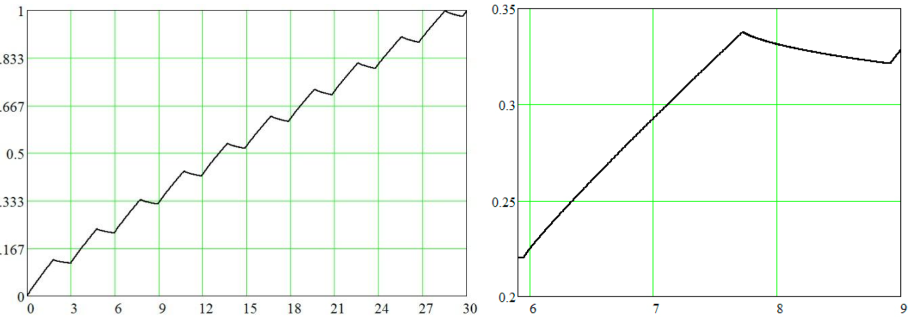


Рис. 1. Розрахунок заформулою (7)

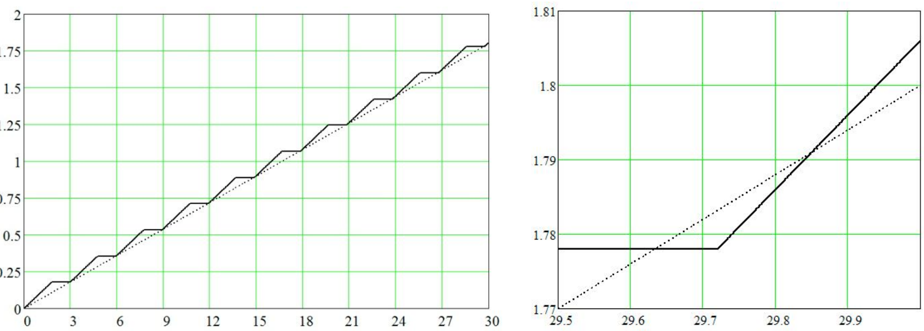
відповідає затратам на впровадженні відповідної технології, яка б строго дозволила відтворити режим деформування(10). Ефект від оптимізації буде вищим, якщо розглядати матеріали у яких більш яскраво виражена залежність пластичності від швидкості деформування.

Динаміка зміни накопичення пошкоджень у матеріалі та накопиченої деформації при застосуванні циклічного деформування із паузами з параметрами (10) зображена на рис. 2 та 3.



а) б)

Рис. 2. Динаміка зміни накопичення пошкоджень (а), теж саме для ділянки що розглядається окремо (б).



а) б)

Рис. 3. Динаміка зміни накопиченої деформації (а), теж саме для ділянки що розглядається окремо (б).

Висновки. У роботі сформульована та розв'язана задача визначення параметрів гарячого циклічного деформування із паузами, при яких за заданий час матеріал здобуває найбільшу деформацію. Проведений порівняльний аналіз результатів оптимізації із відомими експериментальними даними деформування із сталою швидкістю.

Список литературы: 1. *Михалевич В. М.* Формулювання варіаційної задачі для моделі накопичення пошкоджень при гарячому деформуванні / В. М. Михалевич, В. О. Краєвський // В зб.: «Обробка матеріалів тиском» . Збірник наукових праць. – Краматорськ, 2009. – №2(21). – С. 12-16. – ISBN 978-966-379-339-9. **2.** *Михалевич В. М.* Вісесиметрична осадка циліндричних заготовок / *В. М. Михалевич, В. О. Краєвський, Ю. В. Добранюк* // Наукові нотатки: міжвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»). – Луцьк: – 2009 – Випуск 25, ч. 1 – С. 241-249. – ISBN 5-7763-8653-5. **3.** *Михалевич В. М.* Поиск решения вариационной задачи при горячем деформировании / *В. М. Михалевич, В. О. Краєвський* // В зб.: «Обробка матеріалів тиском» . Збірник наукових праць. – Краматорськ, 2010. – №1(22). – С. 38-43. **4.** *Михалевич В. М.* Тензорні моделі накопичення пошкоджень / *В. М. Михалевич* – Вінниця: "УНІВЕРСУМ–Вінниця", 1998 – 195 с. ISBN 966-7199-20-7. **5.** *Богатов А. А.* Влияние горячей прерывистой деформации на пластичность металла / *А. А. Богатов, М. В. Смирнов, В. А. Криницын и др.* // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1981. – №12. – С. 37-40.