

УДК 621.7.011; 621.7.043

Грушко О. В.

**ФЕНОМЕНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ СТВОРЕННЯ КАРТ МАТЕРІАЛІВ
ДЛЯ ПРОЦЕСІВ ХОЛОДНОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ**

Одним із ефективних шляхів удосконалення процесів обробки металів тиском (ОМТ) є детальне вивчення механіки процесу деформації з подальшим аналізом та вибором раціональних технологічних параметрів, режимів обробки, геометрії інструменту та заготовки на стадії проектування. В свою чергу, дослідження механіки формоутворення виробу завжди потребує відомостей про характеристики опору пластичного деформування, від надійності і якості отримання яких досить часто залежить загальна стабільність і ефективність технологічної операції обробки тиском. Основою отримання таких залежностей стають феноменологічні підходи, що мають експериментальну основу, в тому числі чисельного моделювання методом скінчених елементів (МСЕ), та її коректне поєднання із фізичними законами деформування твердого тіла та математичним апаратом аналізу. На відміну від стандартизованих у інженерній справі методик дослідження механічних характеристик металу (міцності, пластичності), методи формування карти матеріалу знаходиться в процесі становлення та розвитку. Через нерегламентовані стандартами механічні властивості металу в пластичній області (які, як правило, є функціями), останнім притаманний досить великий статистичний розкид водночас з невеликими довірчими інтервалами стандартизованих характеристик (які є скалярними). Як наслідок, при проектуванні технологічних процесів із використанням літературних даних про деформуємі матеріали, необхідно збільшувати запаси. А в процесах, що перебігають близько до граничних меж, можливе виникнення браку, технологічних відмов у вигляді тріщин, розривів металу, складок, гофрів, місцевих стоншень металу тощо. Тому, коректне формування карти матеріалу методами технологічної механіки, уточнення її для конкретної партії металу сприяє удосконаленню моделювання процесів ОМТ, прогнозуванню технологічних відмов та підвищенню їхньої ефективності [1–7].

Поняття карти матеріалу увійшло в технічну термінологію в 80–90 роки ХХ століття завдяки працям Ф. Барлата, Г. Гезе, Г. Д. Деля, В. В. Єлісеєва, Д. Ліана, В. А. Огороднікова, Й. Хаяшіда, Д. В. Хвана, Р. Хіла та ін. Необхідність виділення цього поняття пов'язана із бурхливим розвитком програм скінчено-елементного моделювання, які потребують відповідні параметри для коректного проведення розрахункової процедури. Науково-теоретичним підґрунтям формування моделей поведінки матеріалу в пластичній області є фундаментальні праці А. А. Ільюшина, Г. Бакхауза, Г. О. Смірнова-Аляєва, Г. Я. Гуна, В. С. Смірнова, Л. Д. Соколова, С. І. Губкіна, Р. Хіла, А. Надаї, В. Лоде, Л. М. Качанова, І. Баушингера та ін. Значний внесок в експериментальні та експериментально-теоретичні дослідження характеристик опору пластичному деформуванню зроблено В. А. Огородніковим, Д. В. Хваном, Я. Є. Бейгельзімером, В. А. Крохою, А. В. Третьяковим, Г. Я. Гуном, П. І. Полухіним, А. Хензелем, Т. Шпіттелем, М. Я. Дзугутовим, В. А. Скудновим, В. Л. Колмогоровим тощо.

В карті матеріалу можна виділити такі групи властивостей матеріалів, що впливають на механічний стан металу при його технологічній обробці тиском методами холодного пластичного деформування (ХПД): а) ті, що впливають і формують поверхню пластичної течії, зокрема перехід металу в пластичний стан, форму поверхні, особливості її розвитку в процесі навантаження, в тому числі складного немонотонного; б) ті, що встановлюють граничні межі поверхні пластичної течії, зокрема при простому деформуванні – діаграми руйнування (пластичності), діаграми стійкості; в) ті, що є наслідком процесу деформації, формуючи якість виробу, технологічну спадковість, наприклад, вплив термообробки на деформований метал, утворення наноструктур, ліній ковзання на поверхні тощо.

Кількість констант повної карти реологічно складного матеріалу може сягати 50 і більше, проте більшість процесів ОМТ не вимагає повного і всебічного представлення властивостей металу для проведення необхідних розрахунків чи побудови відповідних моделей.

Натомість, такі функції, як криві течії та діаграми руйнування виявляються найуживанішими при проведенні розрахунків процесів ХПД, особливо при визначенні напружено-деформованого стану (НДС), енергосилових параметрів, граничних можливостей формозмінювання.

Метою роботи є розробка на феноменологічній основі ефективних методів отримання кривих течії та діаграм граничних деформацій, які входять до складу карти матеріалу, що деформується, та їхнє використання для моделювання й удосконалення процесів обробки металів тиском в холодному стані.

В роботі розглядається ізотропне зміцнення матеріалу, що є ізотропним в початковому недеформованому стані.

Метод побудови кривої течії за результатами обробки машинної діаграми розтягу в області розвитку шийки, що утворюється при випробовуванні циліндричного зразка

Встановлено, що при розтягу циліндричного зразка на стадії формування шийки, її зовнішній контур можна описати залежністю [8], яка подібна до функції Гауса закону нормального розподілу:

$$d(x) = d_{ycm} + (d_{mini} - d_{ycm}) \exp \left[- \left(\frac{x - x_c}{w} \right)^2 \right], \quad (1)$$

де $d(x)$ – діаметр зразка з координатою x ;

d_{mini} – найменший діаметр зразка по шийці;

x_c – координата d_{mini} ;

d_{ycm} – діаметр зразка, що відповідає стійким деформаціям, тобто початку зародження шийки;

w – параметр функції Гауса.

Метод дозволяє значно уточнити криву течії між моментом появи шийки і розривом зразка без необхідності відеоспостереження за зразком з метою встановлення його геометрії в поточному стані розтягу. Для пластичних матеріалів ця область може бути суттєво ширшою по деформаціям, ніж ділянка, що відповідає стійким деформаціям. Для сталі 20, наприклад, діапазону $e_i = 0 \dots 0,2$ відповідають стійкі деформації розтягу, діапазону $e_i = 0,2 \dots 1,2$ – деформації, що накопичуються в шийці від моменту її появи до розриву зразка.

Метод побудови кривої течії за границями міцності і текучості ґрунтується на апроксимації кривої течії за функцією П. Людвіга:

$$\sigma_i = A \cdot e_i^n. \quad (2)$$

Якщо крива течії матеріалу слідує даній залежності, то утворення шийки (втрата стійкості пластичного деформування) починається при деформаціях $e_{ikk} = n$, що відповідає границі міцності σ_ϵ .

Коефіцієнти апроксимації n (показник зміцнення) та A (модуль зміцнення) знаходяться шляхом розв'язання системи нелінійних рівнянь [9]:

$$\sigma_{0,2} = A \cdot 0,002^n \quad \text{та} \quad \sigma_\epsilon = A \cdot \exp(-n) \cdot n^n, \quad (3)$$

де 0,002 (або e_m) – допуск на пластичну деформацію;

$\sigma_{0,2}$ – умовна границя текучості, напруження, що відповідає відносному залишковому видовженню 0,2 %;

Відмітимо особливості методу: крива течії має велику чутливість до деформації початкової границі текучості; точності визначення границь текучості і міцності; відповідності реальної поведінки матеріалу апроксимації (2).

Метод побудови кривої течії за твердістю Брінеля ґрунтується на апроксимації кривої течії за функцією (2) та моделюванні випробовування твердості МСЕ.

Основним випробуванням твердості металів є випробування за Брінелем шляхом вдавлення кульки діаметром 10 мм із зусиллям 3000 кг в поверхню досліджуваного матеріалу. Залежність між твердістю HB та параметрами A і n встановлена так [10]:

$$HB_{3000} = -82,61 + 98,45n^{0,349} + 1,942A^{0,798} - 1,989n^{0,349}A^{0,798}, \quad (4)$$

де HB_{3000} в кгс/мм², A в МПа.

Одному значенню твердості може відповідати достатньо широкий розкид аргументів, тому необхідно використати додаткові умови для однозначного визначення функції течії.

Відомо, що між твердістю та границею міцності, в межах певної групи металу, існує емпіричний лінійний зв'язок:

$$\sigma_e = a + b \cdot HB, \quad (5)$$

який може бути використано в якості необхідної умови. Коефіцієнти a , b встановлені для матеріалів, що об'єднуються за певним хімічним складом та реологію. Сумісне розв'язання рівнянь (4) та (5) дає значення параметрів A і n .

Відзначимо, що при моделюванні вимірювання твердості використовувалася степенева апроксимація кривої течії (2), тому, якщо матеріал не слідує такому закону зміцнення, то слід чекати відхилень розрахованих значень від дійсних. Також, емпіричний зв'язок (5) встановлений для нетермооброблених, без початкового деформаційного зміцнення, в стані постачання, що обмежує область використання методу.

Збільшити точність методу твердості можна шляхом додаткового вимірювання твердості при навантаженні 250 кгс, оскільки твердість за Брінелем залежить від навантаження на шаровий індентор. Залежність HB_{250} від A і n має вигляд:

$$HB_{250} = -77,72 + 79,32n^{0,396} + 5,603A^{0,624} - 6,088n^{0,396}A^{0,624}, \quad (6)$$

де HB_{250} – в кгс/мм², A – в МПа.

Сумісне розв'язання рівнянь (4) та (6) дає значення параметрів A і n із похибкою не більше 10 %.

Вплив швидкості деформування металу в холодному стані на його криву течії слід враховувати при розрахунку динамічних процесів ОМТ. Динамічна дія на метал заготовки, як правило, підвищує границю текучості, міцності, зміцнюваність металу. У літературі досить слабо представлені дані впливу швидкості деформації на зміцнення в холодному стані більшості конструкційних матеріалів.

Метод динамічних коефіцієнтів

Встановлено [11], що при сталій швидкості деформування криві течії різних металів (вуглецеві, леговані сталі, деякі алюмінієві сплави) досить точно слідують степеневим функціям, найпоширенішою з яких є апроксимація (2), яка набуває виду:

$$\sigma_i = A_V e_i^{n_V}, \quad (7)$$

де A_V , n_V – коефіцієнти, що враховують вплив швидкості деформацій на напругу текучості, вони нелінійно залежать від швидкості деформацій і прямопропорційні відповідним статичним характеристикам:

$$A_V = A \cdot f_A(\dot{e}_i) = A \left[1,045 + \frac{1}{135} \ln(0,00227 + \dot{e}_i) \right], \quad n_V = n \cdot f_n(\dot{e}_i) = n \left[\exp[-0,127 \ln(1 + \dot{e}_i)] \right], \quad (8)$$

де \dot{e}_i – швидкість інтенсивності деформацій;

A і n – коефіцієнти апроксимації кривої течії, побудованій без урахування швидкості деформації (квазістатична деформація). Вирази отримані шляхом регресійного аналізу експериментальних даних.

Перевірка запропонованої моделі для досліджених матеріалів (сплавів на основі заліза) показала, що розбіжність експериментальних даних коефіцієнтів апроксимації і отриманих за виразами (8) знаходиться в межах 15 %.

Недоліком моделі (7) є однакова динамічна зміцнюваність при ідентичних статичних кривих течії, що не узгоджується з експериментом для металів різного реологічного класу (наприклад, сталі та алюмінієві сплави).

Визначення динамічної кривої течії вимірюванням твердості HL за Лібом

В основу метода покладено вимірювання динамічної твердості (*HL* за Лібом), статичної (за Брінелем) та ідею, що динамічна крива течії може бути отримана із статичної шляхом її масштабування. При цьому масштабний коефіцієнт залежить від швидкості деформації та характеристик металу:

$$\sigma_i = \sigma_{ist}(e_i) f_\sigma(\dot{e}_i) = A(e_0 + e_i)^n \dot{e}_i^m, \quad (9)$$

$\sigma_{ist}(e_i)$ – функція напруги течії, що отримана в квазістатичних умовах;

$f_\sigma(\dot{e}_i)$ – функція впливу швидкості деформацій на напругу течії;

\dot{e}_i – інтенсивність швидкостей деформацій;

m – показник швидкісного зміцнення (константа матеріалу);

e_0 – деформація, що відповідає початку текучості.

На основі МСЕ промодельовано процес вимірювання твердості за Лібом [12]. Властивості матеріалу задавали за моделлю (9), з урахуванням швидкісного зміцнення.

Статична крива течії пов'язана із твердістю за Брінелем згідно (5). В результаті статистичної обробки даних, для окремих груп матеріалів знайдено регресійну залежність ($R_{adj}^2 = 0,96$), що пов'язує статичну, динамічну твердість та показник швидкісного зміцнення у вигляді поліному 2-го ступеня:

$$m = m_0 + a \cdot HB + b \cdot HL + c \cdot HB^2 + d \cdot HL^2 + f \cdot HB \cdot HL, \quad (10)$$

де, a , b , c , d , f – коефіцієнти апроксимації які залежать від групи сталі за її хімічним складом;

HB вимірюється в кгс/мм², (границі 100–300 кгс/мм²);

HL – безрозмірна величина (300–800).

Метод має задовільну точність з похибкою в межах 10 %, проте має певні обмеження: його можна застосовувати лише для визначених груп сталей в стані постачання без початкового деформаційного зміцнення.

Визначення динамічної кривої течії вимірюванням твердості за Брінелем при двох навантаженнях та твердості Ліба

Значенню динамічної твердості можна поставити у відповідність статичну при 2-х навантаженнях та функцій показника швидкісного зміцнення m ($R_{adj}^2 = 0,985$):

$$HL = a_0 + a_1 \cdot HB_{3000} + a_2 \cdot HB_{250} + a_3 \cdot HB_{3000}^2 + a_4 \cdot HB_{250}^2 + a_5 \cdot HB_{3000} \cdot HB_{250},$$

де $a_0, a_1 \dots a_5$ – коефіцієнти, що залежать від m .

Перевірку запропонованого методу провели для ряду сталей: ШХ15, Х18Н9Т, 20Х, Сталь 20, Сталь 45. Вимірювання твердості за Лібом виконували з використанням переносного твердоміра ТЕМП-4. Динамічну криву течії будували з використанням унікального динамічного стенду, що забезпечує різні швидкості навантаження.

Так, для сталі ШХ15, стан постачання, експериментально розраховані значень: $HB_{3000} = 2011$ МПа, $HB_{250} = 1560$ МПа, $HL = 497$, $A = 1250$ МПа, $n = 0,21$, $m = 0,033$. Розраховані значення склали $A = 1300$ МПа, $n = 0,23$, $m = 0,03$. Похибка визначення параметрів: $A - 4\%$, $n - 9,5\%$, $m - 10\%$. Аналогічну точність мають A , n і m , отримані для решти досліджених матеріалів.

Відзначимо, що однаковим числам стандартної твердості HB_{3000} відповідають різні значення HL залежно від величин A і n , при рівних показниках швидкісного зміцнення m . У свою чергу, параметр m також робить істотний вплив на HL за інших рівних умов. Отже, в загальному, перевід чисел твердості HL в HB_{3000} є некоректним. Це стосується і для матеріалів, що відносяться до однієї групи за хімічним складом.

Важливим питанням при формуванні параметрів карти матеріалу, є визначення його граничного стану за деформуемістю та втратою стійкості. Надійність оцінки деформуемості залежить зокрема від достовірних даних пластичності металу в залежності від схеми напруженого стану. Поширеним випробовуванням на пластичність є розтяг циліндричних зразків, проте для матеріалів, що утворюють шийку, характерне аномально високе значення пластичності – перевищує очікуване в 1,5...2,5 і більше рази. Цей факт суперечить відомій в теорії деформуемості гіпотезі про зниження пластичності металу при збільшенні (алгебраїчно) відносного гідростатичного тиску за В. О. Бабичковим $\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}$.

Феноменологічний підхід створює перспективи щодо побудови діаграми пластичності із використанням, в тому числі, випробовування на розтяг. Введено припущення, що вплив головних напружень є неоднаковим, щодо накопичення пошкоджень в матеріалі, який пластично деформується. Причому, даний вплив залежить від виду матеріалу. Таким чином, запропоновано показник напруженого стану, що враховує константи металу [13]:

$$\zeta = \frac{k_1\sigma_1 + k_2\sigma_2 + k_3\sigma_3}{\sigma_i} = k_1a_1 + k_2a_2 + k_3a_3,$$

де $a_1 = \frac{\sigma_1}{\sigma_i}$, $a_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_i}$, $a_3 = \frac{\sigma_3}{\sigma_i}$ – відносні головні напруги;

k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти впливу відносних головних напруг на пластичність металу. k_1, k_2, k_3 є механічними характеристиками матеріалу. Надалі покладено $k_1 = 1$.

Діаграма руйнування $e_p(\zeta)$ коректно описується експоненціальними монотонними функціями і має суттєво вищу кореляцію з експериментом, ніж традиційна діаграма пластичності $e_p(\eta)$. Знайдено конкретний вид апроксимуючої функції $e_p(\zeta)$:

$$e_p = d \cdot \exp(-q \cdot \zeta) = d \cdot \exp(-q \cdot (a_1 + \bar{k}_2 a_2 + \bar{k}_3 a_3)),$$

де $\bar{k}_2 = \frac{k_2}{k_1}$, $\bar{k}_3 = \frac{k_3}{k_1}$ – коефіцієнти впливу відносних головних напруг, які виражені

в долях по відношенню до впливу відносного першого головного напруження a_1 .

Коефіцієнти \bar{k}_2 , \bar{k}_3 , d , q отримуються за допомогою регресійного аналізу методом найменших квадратів або розв'язку системи відповідних рівнянь. Мінімальна кількість випробувань для отримання діаграми – 4.

На рис. 1 показано діаграми пластичності $e_p(\eta)$ та руйнування $e_p(\zeta)$ для алюмінієвого сплаву 6061-T6 (лист 2 мм). Діаграма $e_p(\zeta)$ описана функцією ($\bar{k}_2 = -0,063$, $\bar{k}_3 = -0,761$):

$$e_p = 2578 \cdot \exp[-8,124 \cdot (a_1 - 0,063 \cdot a_2 - 0,761 \cdot a_3)] = \exp(7,85 - 8,124 \cdot \zeta).$$

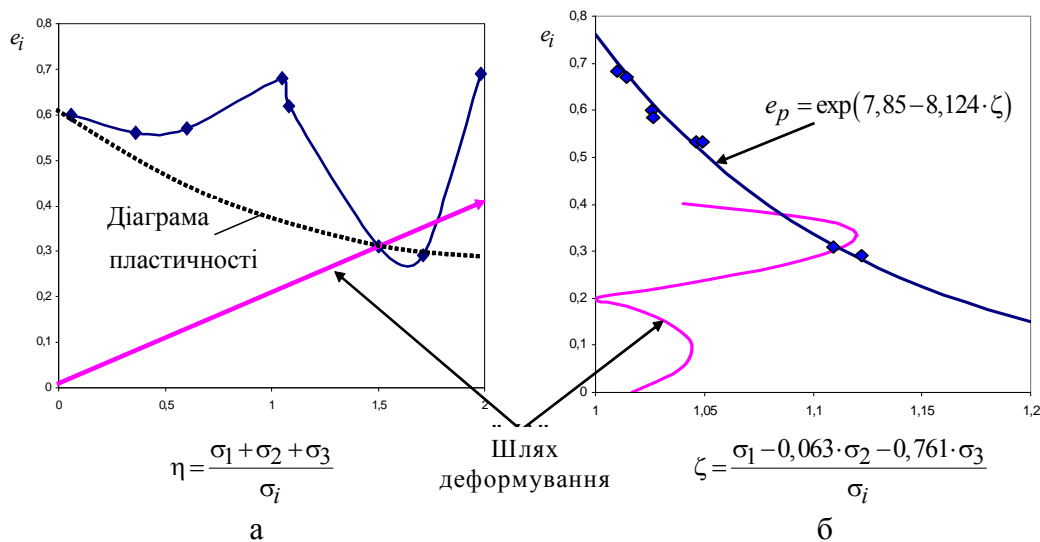


Рис. 1. Діаграми граничних деформацій і шляхи деформування при формуванні патрубків: а – діаграма пластичності алюмінієвого сплаву 6061-T6; б – діаграма руйнування алюмінієвого сплаву 6061-T6

Практичне використання даного параметру для оцінки деформуємості вимагає застосування відповідної моделі (критерію), в залежності від виду навантаження металу в небезпечній області. Замість функціональних значень діаграми пластичності необхідно взяти значення діаграми руйнування або відповідні апроксимації. Застосування параметра ζ дозволяє суттєво уточнити граничні деформації, що в свою чергу підвищує точність визначення степені використаного запасу пластичності ψ (СВЗП). Так, при апроксимації діаграми руйнування і діаграми пластичності експоненціальними функціями, для певного процесу поздовжнього згину трубчатой заготовки із сталі 20 (рис. 1) $\psi_\eta = 0,92$ та $\psi_\zeta = 0,48$, де індексами η , ζ позначено значення ψ , розрахованого із застосування діаграми пластичності (η) та руйнування (ζ).

При визначенні технологічних параметрів операцій обробки тиском за граничними деформаціями, останні пов'язані з деформуємістю і стійкістю пластичних деформацій, що проявляється в руйнуванні, місцевих стоншеннях стінки чи утворенні гофрів. Шляхи деформування, побудовані в залежності від параметрів напруженого стану, повинні бути з певним запасом в межах безпечної області, яка визначається огинаючою феноменологічною кривою (чи поверхнею) граничних деформацій, яка визначається параметрами карти матеріалу.

Метод еквівалентної оцінки енергосилових характеристик процесів ОМТ

На основі даних кривих течії двох модельних та натурального матеріалів, а також експериментальних значень відповідних характеристик, отриманих для модельних матеріалів, можна дістати величини енергосилових характеристик натурального матеріалу без дослідження механіки процесу ОМТ [14].

При розробці методу використано такі припущення: граничні, контактні умови (коефіцієнти тертя), форма вільної поверхні, закон руху інструменту для модельного і натурального матеріалу однакові; крива течії матеріалу слідує степеневому закону зміцнення (2); виконується гіпотеза про кінематичну подібність: деформований стан заготовки не залежить від властивостей металу; графічні залежності $P(x)$ для різних матеріалів еквідистантні – відношення максимального зусилля (або поточного) до середнього мало залежить від властивостей матеріалу $k = \bar{P}/P_{\max} = \text{const}(A, n)$.

Енергетичний підхід. Робота W зовнішньої деформуючої сили P :

$$W = \int_V \int_{e^*} \sigma_i de_i dV + W_f \approx q \frac{A}{n+1} \int_V e_i^{n+1} dV \approx q \frac{A}{n+1} \bar{e}_i^{n+1} V; \quad W = \int_0^l P(x) dx = \bar{P}l \approx P_{\max} kl,$$

де l – шлях, на якому виконується робота сили $P(x)$ (хід робочого інструменту);

V – об'єм тіла, охоплений пластичними деформаціями;

e^* – інтенсивність деформацій, що досягаються в довільній точці;

e_i – функція розподілу інтенсивності деформацій за об'ємом тіла;

\bar{e}_i – середнє значення функції e_i за об'ємом V .

Моделювання полів напруг. На основі співвідношень деформаційної теорії пластичності (в т.ч. теорії течії), з урахуванням вказаних вище допущень, можливе моделювання полів напруги на основі наявних експериментальних даних для модельного матеріалу, його кривої течії і кривої течії натурального матеріалу.

Компоненти тензора напруги для натурального матеріалу:

$$\sigma'_{jj} = z \cdot \sigma_{jj}, \quad \tau'_{jk} = z \cdot \tau_{jk}, \quad \sigma'_0 = z \cdot \sigma_0,$$

де $z = \frac{\sigma'_i}{\sigma_i} = \frac{A'}{A} e_i^{n'-n} = A' A \left(\frac{-n'}{n} \right) \sigma_i \left(\frac{n'-1}{n} \right)$. Параметри, що відносяться до натурального ма-

теріалу, позначені верхнім штрихом.

Залежності узагальненого зусилля P_i для різних процесів ОМД, не залежно від використаного підходу, визначаються за наближеною формулою:

$$P' \approx P_1 \frac{A'}{A_1} \left[\frac{P_2 A_1}{P_1 A_2} \right]^{\frac{n'-n_1}{n_2-n_1}}. \quad (11)$$

Перевірку визначення зусиль виконали шляхом теоретичного аналізу для найпростіших процесів деформування, моделюванням МСЕ процесів розтягу, стиску циліндричних зразків, осадження циліндра перпендикулярно його вісі, згину в штампі. Задавалися коефіцієнтами апроксимації, згідно (2), в межах $n = 0,1 \dots 0,5$ і $A = 500 \dots 1500$ МПа. Похибка розрахунку зусилля за (11), в тому числі при значній екстраполяції, складала не більше 6 %.

Метод еквівалентної оцінки є наближеним і його похибка залежить від виконання низки гіпотез як фізичних, так і математичних, а також від виду деформуючого процесу. Проте максимальна помилка в досліджених випадках, що охоплюють широкий діапазон процесів ХПД, не перевищила 10 %, що дає підставу використовувати даний метод в розрахунках процесів ОМТ.

Удосконалення процесу деформуючого протягування по критерію зміцнення поверхневого шару

Деформуюче протягування (рис. 2) знайшло застосування для обробки отворів в деталях (трубних заготовках). При деформуючому протягуванні товстостінних труб відбувається інтенсивний наклеп поверхневого шару, що характеризується високими ступенями і градієнтом деформацій, залишковими напруженнями стиску і малим СВЗП, що сприятливо позначається на технологічній спадщині деталей, які працюють в умовах циклічних навантажень і тертя [16, 17]. Згідно робіт А. М. Сулими, В. А. Тітова, Ю. О. Цеханова, С. М. Шейкіна, О. О. Розенберга, В. М. Смелянського, І. О. Сивака наклеп поверхневого шару може виступати комплексним параметром оцінки якості на стадії проектування технологічного процесу.

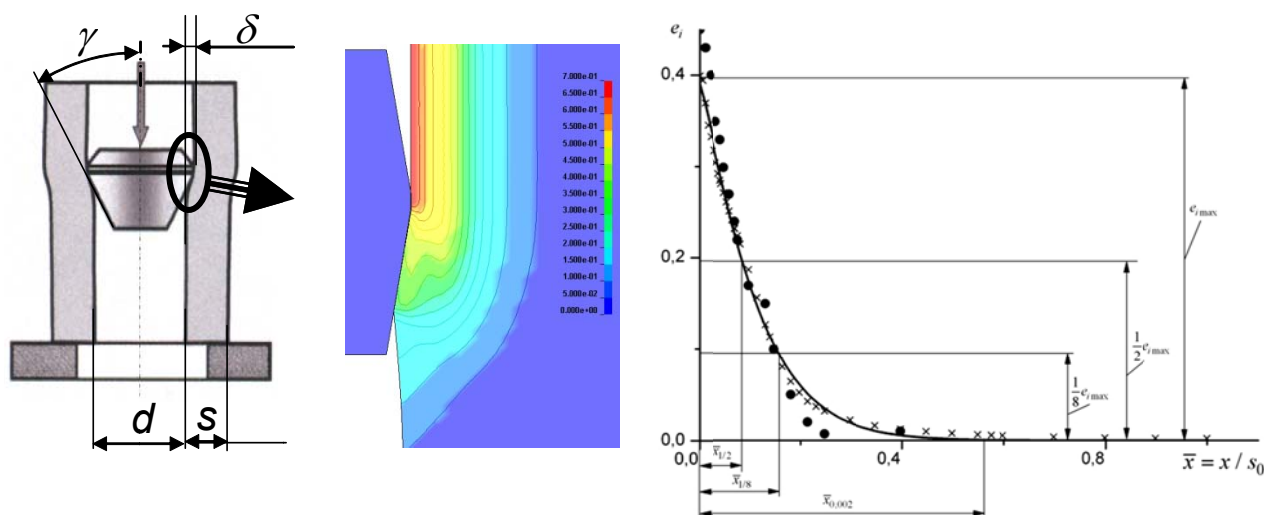


Рис. 2. Схема і розподіл інтенсивності деформацій при деформуючому протягуванні (мітками відмічено розрахунок за МСЕ (×) та методом твердості (•), лінія – апроксимація)

При малих натягах порядку 0,1–1 % товщини стінки (товстостінні труби) спостерігаються складні приповерхневі явища, що впливають на деформаційне зміцнення поверхневого шару: виникає хвиля пластично деформованого металу перед інструментом, відбувається змінання поверхневих нерівностей, реалізується об'ємний напружений стан тощо. Моделювання процесу протягування МСЕ виявило вплив статистично значущих чинників на величину та глибину наклепу.

Встановлено [15], що розподіл інтенсивності деформацій в радіальному напрямку носить характер експоненціального зменшення згідно апроксимації (рис. 2):

$$e_i = D \cdot \exp(-B \cdot \bar{x}^m), \quad (12)$$

де e_i – інтенсивність накопичених логарифмічних деформацій в крапці з відносною координатою \bar{x} , $\bar{x} = x / s$;

$D = e_{i \max}$ – інтенсивність логарифмічних деформацій на поверхні заготовки (при $\bar{x} = x = 0$);

B , m – емпіричні коефіцієнти.

Поєднання МСЕ із методами планування експерименту надало можливість виявити функціональні зв'язки між $e_{i\max}$, $\bar{x}_{1/2}$, $\bar{x}_{1/8}$ (рис. 2) та впливаючими на них параметрами. Задавались граничними значення даних параметрів: товщина стінки заготовки $5 \leq s \leq 100$ мм; відносний натяг на сторону $\bar{\delta} = \delta/s$, $0,001 \leq \bar{\delta} \leq 0,01$; внутрішній відносний діаметр $\bar{d} = d/s$, $0,5 \leq \bar{d} \leq 2$; кут конусності інструменту $5^0 \leq \gamma \leq 10^0$; коефіцієнт тертя за Кулоном $0,05 \leq f \leq 0,15$; модуль зміцнення $500 \leq A \leq 1500$ МПа; показник зміцнення $0,1 \leq n \leq 0,5$.

Проводили моделювання з використанням дробового 6-ти факторного експерименту, центральний композиційний план 2^{6-1} з центрованими зірковими точками, що вимагає реалізації 45 дослідів. Шляхом обробки даних із застосуванням пакету програм Statistica, отримані функції відклику $e_{i\max}$, $\bar{x}_{1/2}$, $\bar{x}_{1/8}$ у вигляді квадратичних моделей:

$$Y(X) = a_0 + \sum_{i=1}^6 a_i X_i + \sum_{i=1}^6 a_{ii} X_i^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq 6} a_{ij} X_i X_j.$$

Адекватність моделей, статистична значущість коефіцієнтів перевірені методами математичної статистики. Похибка розрахунків не перевищує 5–8 %.

Встановлено, що для прийнятих меж зміни факторів, отримані моделі не мають глобальних екстремумів. Максимальне зміцнення ($e_{i\max} = 1,17$), як найважливіший параметр, у вивченій області спостерігається при $\bar{\delta} = 0,01$; $\bar{d} = 0,5$; $f = 0,15$; $\gamma = 10^0$; $A = 500$ МПа; $n = 0,1$. Мінімальне зміцнення – $e_{i\max} = 0,22$.

На величину $e_{i\max}$ найбільш впливає кут конусності інструменту γ , при цьому спостерігається велика кількість парних взаємодій γ з іншими аргументами. Залежність $e_{i\max}(\gamma)$ виявляється близька до лінійної, що підтверджується дослідженнями [16]. Також на $e_{i\max}$ суттєво впливає коефіцієнт тертя f (збільшуючий фактор) і показник зміцнення n (зменшуючий фактор). Від натягу $\bar{\delta}$ велична $e_{i\max}$ мало залежить. На градієнт деформацій $grad e_i$ (або $\bar{x}_{1/2}$) найбільше впливають: натяг на сторону $\bar{\delta}$ (зменшуючий фактор); коефіцієнт тертя f і кут конусності інструменту γ (збільшуючі фактори). На глибину зміцнення $\bar{x}_{0,002}$ (або $\bar{x}_{1/8}$) найбільше впливають: натяг на сторону $\bar{\delta}$ (збільшуючий фактор); показник зміцнення n та модуль зміцнення A (зменшуючі фактори). Вплив інших чинників на $e_{i\max}$, $\bar{x}_{1/2}$, $\bar{x}_{0,002}$ з урахуванням парних взаємодій та нелінійних членів виявляє неоднозначний характер і залежить від рівнів варіювання факторів.

Виходячи з моделі, деформований стан заготовки досить сильно залежить від карти матеріалу, зокрема від кривої течії, оскільки властивості матеріалу формують контактну жорсткість, яка в свою чергу формує пластичну хвилю металу перед інструментом і довжину контакту заготовки і дорну. Останні істотно впливають на деформований стан. Чим вище жорсткість матеріалу – більше модуль зміцнення A і менше показник зміцнення n (або твердість) тим більші деформації розвиваються в матеріалі.

Залежність деформованого стану від кривої течії дає можливість щодо керування механікою процесу в залежності від параметрів A та n з метою його удосконалення. Наприклад, операція відпалу знижує твердість, а отже, знижує параметр A та збільшує n . В результаті $e_{i\max}$ буде зменшуватись, а глибина деформованого шару зростати, що покращує деформуємість та технологічну спадковість. Для деталей, в яких значення наклепу регламентовано, в тому числі для зменшення браку, варто в умовах виробництва проводити розбракування матеріалу за твердістю і призначення відповідних розрахункових технологічних режимів обробки.

Результати моделювання перевірялись методом сіток та твердості (мікротвердості). Також проводився металографічний аналіз, що підтвердило розрахункове значення глибини наклепу і виявило сприятливий розмір та орієнтацію зерен після обробки.

За результатами досліджень апробовано технології протягування трубних заготовок різних типорозмірів з титану ВТ1-0, ВТ-6, ВТ-22; сталей У8, 20, 45, Х18Н10Т. Обробка деталей проводилась при раціональних технологічних режимах, що розраховані за запропонованими моделями. При цьому досягалась необхідна якість отриманих виробів: відсутність мікротріщин обробленого шару, необхідна шорсткість, твердість та глибина наклепу.

ВИСНОВКИ

Феноменологічний підхід із використанням апробованих теоретичних моделей матеріалу, результатів моделювання МСЕ та натурального експерименту надає можливість отримувати необхідні технологічні функції карти матеріалу.

Метод твердості, при вимірюванні останньої двома різними силами має найвищу точність (кореляція 0,94...0,97), низьку вартість, зручність випробовування. Метод побудови кривої (кореляція 0,93...0,98) на ділянці шийкоутворення більш трудомісткий, проте теж використовує стандартне обладнання і не обмежений ступенем апроксимацією кривої течії. Методи, що ґрунтуються на довідникових даних, найменш точні (кореляція 0,8...0,95), проте можуть бути корисними, у випадку неможливості проведення випробовування металу. Криві течії, які побудовані за твердістю, усереднені по осередку деформацій в умовах об'ємного стиску. Отже, доцільно їхнє використання для розрахунків процесів ОМТ, які характеризуються об'ємністю напруженого стану, наприклад, для процесу деформуючого протягування.

Метод динамічних коефіцієнтів дозволяє провести оціночні розрахунки динамічних кривих течій і дає задовільні результати для вуглецевих та низьколегованих сталей, її недоліком є однакове швидкісне зміцнення різних металів при їхніх рівній зміцнюваності в квазі-статичних умовах. Метод твердості використовує динамічну твердість за Лібом та статичні характеристики. Похибка визначення показника швидкісного зміцнення – 10...15 %.

Запропонований показник напруженого стану, який містить коефіцієнти впливу відносних головних нормальних напруг, що є механічними характеристиками та включені в карту матеріалу. Виявлено, що коефіцієнт \bar{k}_3 для досліджених алюмінієвих сплавів дорівнює – 0,76...-0,79, вуглецевих сталей -0,82...-0,85. Для отримання діаграми руйнування необхідно провести 4 випробовування для різних умов навантаження. Використання діаграми руйнування $e_p(\zeta)$ у відомих деформаційних критеріях для процесів, що перебігають в області додатних гідростатичних напруг, може суттєво уточнити значення ступеня використаного запасу пластичності – до 2-х раз.

На основі кривих течій модельного та натурального матеріалів, що зміцнюються, та експериментальних значень полів напружень та енергосилових факторів модельного матеріалу розвинуто теорію та отримано залежності, за якими визначаються відповідні напружені стани, деформувальні зусилля, робота деформації для натурального матеріалу без додаткового теоретичного та експериментального дослідження. Показники зміцнення модельних матеріалів мають бути не менше 0,1 і мати як мого більшу різницю, що забезпечує коректність моделювання.

Вдосконалення процесу протягування, зокрема керування якістю та технологічною спадковістю заданого типорозміру виробу, згідно отриманих моделей, можна здійснити варіюванням: параметрів кривої течії, значення коефіцієнта тертя (умовами змащування), кута інструменту та натягу для встановлення їхніх раціональних значень. Відносний діаметр може бути тільки зменшений шляхом зовнішнього бандажування. Крива течії та діаграми руйнування формують карту матеріалу для деформуючого протягування і можуть бути змінені шляхом його попередньої термообробки (як правило, відпалу), та формують карту матеріалу для деформуючого протягування. Це сукупності вирішує окремі або комплексні задачі щодо деформівності, забезпечення технологічної спадковості (зносостійкості, ресурсу деталі, сприятливої мікроструктури) та зниженні деформувальних зусиль.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Dell H. *CrachFEM A Comprehensive Approach For The Prediction Of Sheet Metal Failure* / H. Dell, H. Gese, G. Oberhofer // *NUMIFORM '07, Materials Processing and Design : Modeling, Simulation and Applications, Porto, 18–21 June 2007, American Institute of Physics, CP908.* – P. 165–170.
2. Параметры модели, формирующей карту материала в процессах обработки давлением / В. А. Огородников, Л. И. Алиева, В. М. Кожушаный, И. А. Деревенько // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов.* – Краматорск : ДГМА. – 2011. – № 1 (26). – С. 91–98.
3. Calibration and evaluation of seven fracture models / T. Wierzbicki, Y. Bao, Y.-W. Lee, Y. Bai // *International Journal of mechanical Sciences.* – 2005. – № 47. – P. 719–743.
4. Luo M. *Ductile Fracture Calibration and Validation of Anisotropic Aluminum Sheets* / M. Luo, T. Wierzbicki // (11 pages) *By Massachusetts Institute of Technology Conference : 2009 SEM Annual Conference & Exposition on Experimental & Applied Mechanics Proceedings, June 1–4, 2009.*
5. Kolleck R. *Failure prediction method for hydro forming simulation of thick walled tubes* / Ralf Kolleck, Peter Auer, Gerfried Auer // *The 14th International Esaform Conference On Material Forming: ESAFORM 2011. AIP Conference Proceedings, Volume 1353, 2011.* – P. 295–300.
6. Огородников В. А. Энергия. Деформации. Разрушение (задачи автотехнической экспертизы) / В. А. Огородников, В. Б. Киселев, И. Сивак. – Винница : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 204 с.
7. Карты механических свойств субмикроструктурных материалов / Я. Е. Бейгельзимер, Ю. В. Гусар, Д. В. Прилепо, В. Д. Бахмацкий, Е. А. Абрамова, Т. К. Ткаченко // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов.* – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 1 (30). – С. 80–84.
8. Грушко А. В. Построение кривых течения материалов с учетом шейкообразования / А. В. Грушко, В. А. Огородников, В. И. Муzychuk // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением.* – 2007. – № 8. – С. 16–20.
9. Грушко О. В. Определение кривой течения материала по стандартным механическим характеристикам / О. В. Грушко // *Вісник Національного технічного університету України «КПІ».* – 2010. – № 60. – С. 133–137. – (Серія «Машиностроение»).
10. Грушко А. В. Определение параметров кривой течения материала по его твердости / А. В. Грушко // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов.* – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 2 (23) – С. 83–87.
11. Огородников В. А. Учет скоростного упрочнения материалов при оценке энергии пластического деформирования элементов конструкции автомобиля / В. А. Огородников, А. В. Грушко, В. В. Захаров // *Известия ТулГУ.* – Тула : ТулГУ. – 2005. – Вып. 3. – С. 26–33. – (Серия «Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением»).
12. Грушко А. В. Определение параметров скоростного упрочнения материала по его твердости / А. В. Грушко // *Вісник НТУ «ХПІ» : тематичний випуск : Нові рішення в сучасних технологях.* – Харків : НТУ «ХПІ». – 2011. – № 45. – С. 119–124.
13. Грушко А. В. Параметр напряженного состояния, учитывающий свойства материала, и его влияние на пластичность / А. В. Грушко // *Вісник Національного технічного університету України «КПІ».* – 2012. – № 64. – С. 220–226. – (Серія «Машиностроение»).
14. Огородников В. А. Моделирование процессов обработки давлением на основе гипотез о силовом и кинематическом подобии параметров деформирования / В. А. Огородников, А. В. Грушко, И. А. Деревенько // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов.* – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 4 (34). – С. 46–52.
15. Грушко А. В. Упрочнение поверхностного слоя трубчатой заготовки при деформирующем протягивании / А. В. Грушко // *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов.* – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 1(26). – С. 85–90.
16. Розенберг О. А. Технологическая механика деформирующего протягивания / О. А. Розенберг, Ю. А. Цеханов, С. Е. Шейкин. – Воронеж : Воронеж. гос. технолог. акад. 2001. – 203 с.
17. Сулима А. М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А. М. Сулима, В. А. Шулов, Ю. Д. Ягодкин. – М. : Машиностроение, 1988. – 240 с.

Грушко О. В. – канд. техн. наук., доц. ВНТУ.

ВНТУ – Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

E-mail: grushko@svitonline.com

Стаття надійшла до редакції 03.03.2013 р.