

ОЦІНКА ДЕФОРМОВНОСТІ МАТЕРІАЛУ ЗАГОТОВОК ПРИ ПРЯМОМУ ВИДАВЛЮВАННІ МЕТОДОМ ШТАМПУВАННЯ ОБКОЧУВАННЯМ

В статті приведені результати розробки і дослідження технологічної схеми прямого видавлювання методом штампування обкочуванням конічним валком для отримання складно профільних заготовок. Оскільки технологічні можливості при цьому залежать від деформовності матеріалу, то був проведений аналіз напружено-деформованого стану заготовок з використанням методу сіток, вимірювання твердості та мікроструктурного аналізу. Головним результатом аналізу стала побудова шляхів деформування часток матеріалу заготовок в координатах «інтенсивність деформацій – показник напруженого стану». Встановлені зони заготовок, які деформуються в умовах «жорсткого» напруженого стану, тому саме для цих зон проведена оцінка деформовності металів. Для оцінки деформовності матеріалу заготовок побудували модель накопичення пошкоджень, що базується на критерії В. Огороднікова та певної методики побудови апроксимації кривої граничних деформацій. З результатів дослідження деформовності матеріалу заготовок випливає, що у порівнянні з лінійним принципом накопичення пошкоджень, розрахунок за моделлю, що базується на критерії В. А. Огороднікова знижує розрахункове значення граничної деформації. В той же час призначення параметру нелінійності накопичення пошкодження значень, що задовольняють умові $n > 1$, призводить до підвищення розрахункового значення граничної деформації у порівнянні з лінійним принципом накопичення пошкоджень.

Ключові слова: складно профільна заготовка, штампування обкочуванням, конічний валок, пряме видавлювання, напружено-деформований стан, деформовність.

Сучасна металообробка передбачає забезпечення високої ефективності виробництва, що досягається широким використанням у якості заготівельних операцій процесів обробки металів тиском (ОМТ). Особливо суттєвий ефект досягається при виготовленні методами ОМТ складно профільних заготовок. Труднощі, при застосуванні таких методів, пов'язані із можливістю отримання заготовок необхідної форми через складність управління механікою формозміни при використанні того чи іншого інструменту (оснащення). У разі вирішення відзначеної проблеми виникає можливість виготовлення заготовок із досягненням значних деформацій. А це, в свою чергу, обумовлює небезпеку руйнування матеріалу заготовок, в силу його недостатньої деформовності [1, 2, 3].

Велику номенклатуру виробів дозволяють виготовляти процеси видавлювання: прямого, зворотного, бокового, радіального, комбінованого. Ці процеси набули широкого розвитку завдяки результатам досліджень І. С. Алієва, Л. І. Алієвої [2, 3]. Значною мірою вирішувати проблеми виготовлення заготовок складно профільних деталей дозволяє процес штампування обкочуванням (ШО) [1, 4]. Його характерною відмінністю є те, що зона деформації має локальний характер, а формування заготовки відбувається внаслідок багатократного її обкочування циліндричним або конічним валками. Це покращує умови плинності матеріалу заготовки на контакті з інструментом і дозволяє отримувати розвинуті тонкостінні елементи. При цьому необхідний профіль виробів можна отримати шляхом застосування обґрунтованих технологічних схем, а також шляхом цілеспрямованого взаємного розташування деформівних валків і заготовки [5]. Як показано в роботі [6], при використанні операції зворотного видавлювання методом ШО в зоні деформування реалізується м'яка схема напруженого стану, що забезпечує сприятливі умови деформовності і розширює технологічні можливості процесу порівняно з традиційним видавлюванням. Сприяє підвищенню ефективності використання процесів ШО і розробка штампів з диференціальним затиском для різання заготовок під точно штампування [7]. Проте невирішеною залишається проблема оцінки деформовності матеріалу заготовок в процесах прямого видавлювання методом ШО.

Для реалізації поставлених завдань нами був досліджений напружено-деформований стан (НДС) матеріалу заготовок при прямому видавлюванні методом ШО [8]. Існують методи оцінки деформовності матеріалів, що базуються на критерії В. Огороднікова [9] та певної методики побудови апроксимації кривої граничних деформацій [1, 10–13].

Метою даної роботи є розробка і реалізація схем прямого вдавлювання методом ШО і оцінка деформовності матеріалу складно профільних заготовок для запобігання браку від руйнування та забезпечення високих службових характеристик виробів.

На рис. 1 показана технологічна схема, з використанням якої нами досліджувалася можливість формувати елементи складно профільних деталей.

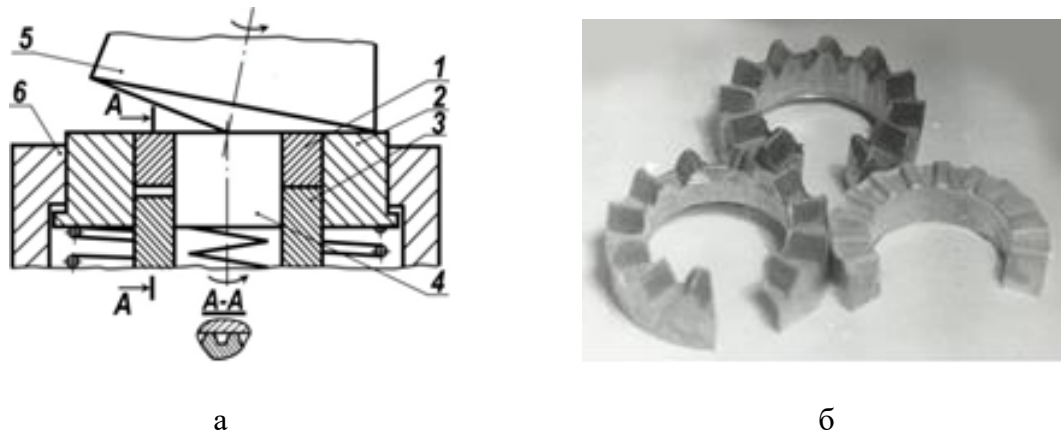


Рис. 1. Схема штампування обкочуванням кільцевої заготовки конічним валком 1,а та вигляд деформованих до різних ступенів заготовок 1,б:

1 – заготовка, 2 – зовнішня оправка, 3 – матриця, 4 – внутрішня оправка, 5 – валок, 6 – шпиндель

Реалізація обкочування за схемою на рис. 1,а забезпечує операцію прямого видавлювання або калібрування заготовки зі сторони, протилежної валку. На рис. 1,б показані zdeформовані до різних ступенів заготовки. Операція пряме видавлювання методом ШО була реалізована нами для виготовлення зубчастої муфти. В якості матеріалу заготовки була використана мідь М06.

Для оцінки технологічних можливостей ШО були побудовані для міді М06 градувальний графік в координатах «інтенсивність деформацій (ε_i) – твердість (HV) – інтенсивність напружень (σ_i)» рис. 2 і крива граничних деформацій рис. 3. Тут $\eta = I_1(T_\sigma) / \sqrt{3I_2(D_\sigma)}$ – показник напруженого стану, $I_1(T_\sigma)$ і $I_2(D_\sigma)$ – перший інваріант тензора і другий інваріант дев'ятого напружень.

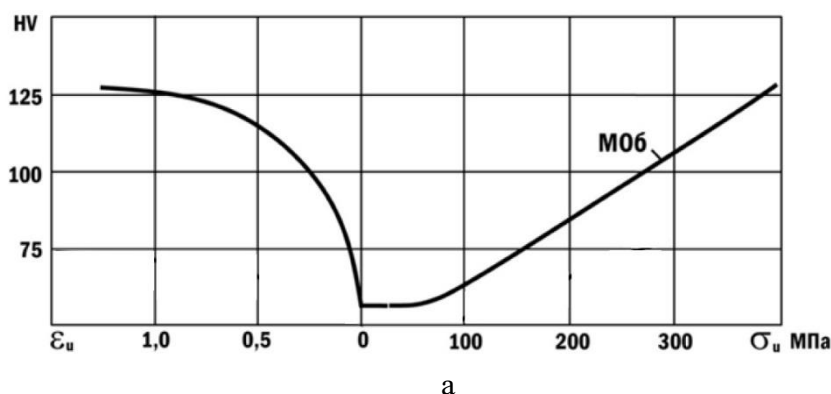


Рис. 2. Градувальний графік міді М06

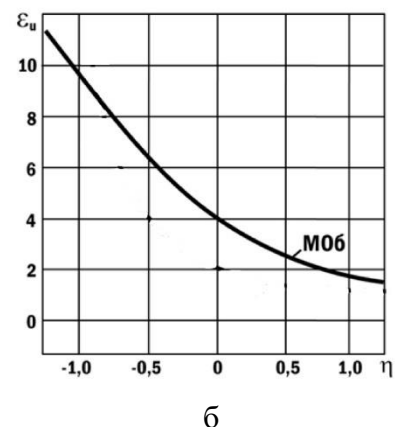


Рис. 3. Крива граничних деформацій М06

Використання мідних заготовок обґрунтовано можливістю достатньо точно визначати до значних степенів деформації за результатами вимірювання твердості HV не лише інтенсивність напружень (σ_i), але і інтенсивність деформацій (ε_i).

Аналіз НДС матеріалу муфт проводили із використанням методу сіток, вимірювання твердості та мікроструктурного аналізу.

На рис. 4 приведено вигляд zdeформованої ділильної сітки і мікроструктури сформованого елемента кулачкової муфти

На рис. 5 приведений характер розподілу інтенсивності деформацій ε_i і показника напруженого стану η по елементу заготовки, отриманому видавлюванням методом ШО на проміжній а) і заключній б) стадіях.

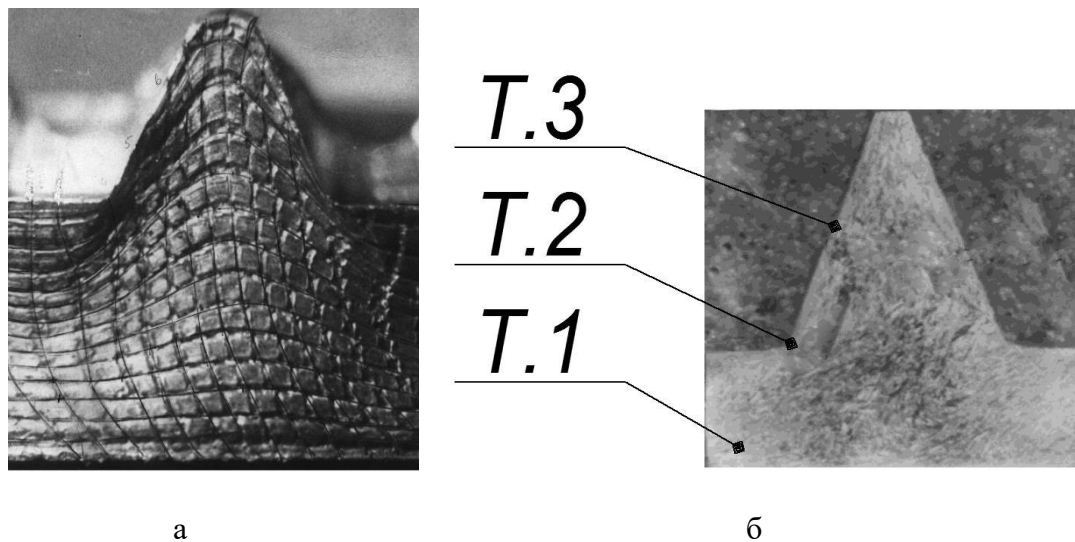


Рис. 4. Вигляд zdeформованої ділильної сітки і мікроструктури елемента кулачкової муфти

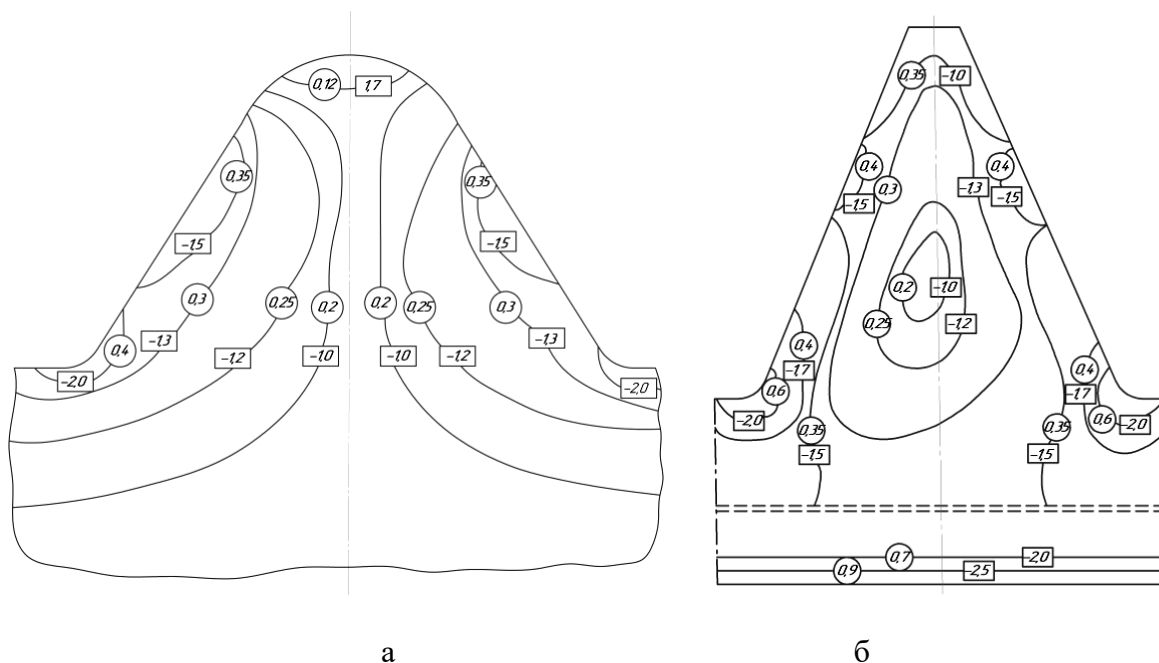


Рис. 5. Характер розподілу параметрів НДС по елементу заготовки, отриманому видавлюванням методом ШО на проміжній а) і заключній б) стадіях: $\eta = const$ (\square) і $\varepsilon_i = const$ (\circ)

Дослідження НДС матеріалу заготовки методом вимірювання твердості проводили за методикою, приведеною в роботі [11]. Розподіл інтенсивності деформацій в зоні витиснутого елемента (див. рис. 5), отриманий методом вимірювання твердості, свідчить про досить нерівномірний характер деформованого стану в перерізі заготовки. Найбільша інтенсивність деформацій, яка спостерігається в зоні контакту валка із заготовкою, сягає значень $\varepsilon_i = 0,9 - 1,0$ та може їх перевищувати. Наступною, найбільш zdeформованою, є зона входу металу в формують канал. Тут інтенсивність деформацій сягає значень $\varepsilon_i = 0,6 - 0,7$. Найменший рівень деформацій спостерігається на вільній вершині витиснутого елемента та в його центральній частині, а інтенсивність деформацій тут сягає значень $\varepsilon_i = 0,1 - 0,2$.

Для дослідження НДС пластичної зони заготовки при прямому витискуванні методом ШО нами застосовано також метод координатних подільних сіток, побудований на використанні методики, основаної на теорії R -функцій [1]. При цьому здійснювалося поетапне видавлювання елемента (див. рис. 1, а) - плоска задача. Характер розподілу ізоліній $\varepsilon_i = const$ в зоні витиснутого елемента, отриманий за результатами вимірювання координатної подільної сітки, співпадає з отриманим за результатами вимірювання твердості. Показник напруженого стану в зоні максимальних деформацій становить $\eta = -2,5 \dots -2,0$ (див. рис. 5). Ці умови свідчать про наявність тут значних напружень стиску, що робить відносно безпечною деформованість матеріалу заготовки. Матеріал заготовки у вершині зуба підлягає відносно невеликим деформаціям, проте показник напруженого стану тут $\eta > +1$, що вимагає проведення оцінки деформованості матеріалу.

Важливою особливістю даної технологічної схеми є те, що частки металу з вільної вершини зуба і «жорсткої» схеми напруженого стану, в процесі видавлювання переходять на контакт з інструментом, де їх деформації продовжують зростати в умовах «м'якої» схеми напруженого стану ($\eta = -1,3 \dots -1,5$). Все це слід враховувати при побудові шляхів деформування часток матеріалу заготовки, для оцінки його деформованості.

При зміні параметрів профілю елемента, що характеризується величинами, приведеними на рис. 6, значення інтенсивності деформацій і показника напруженого стану будуть дещо змінюватися, проте характер їх розподілу зберігатиметься. Зберігатиметься також характер розподілу відзначених величин і при зміні матеріалів, якщо умови тертя залишатимуться незмінними.

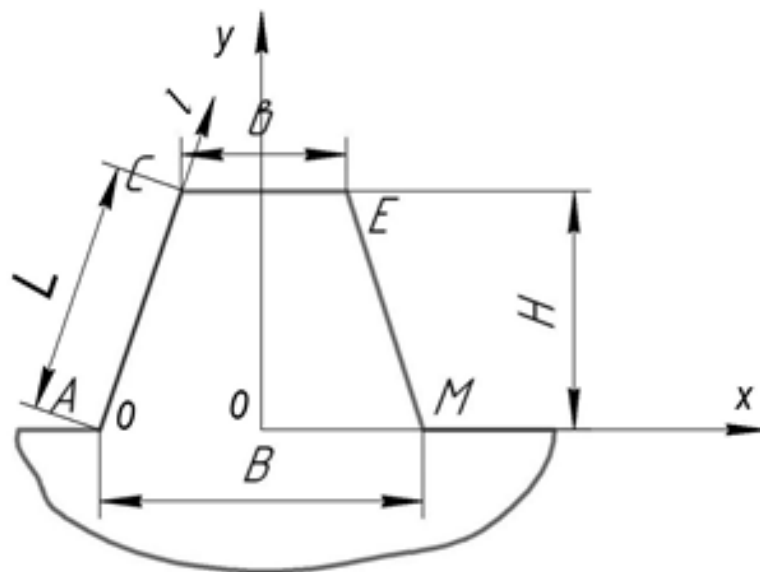


Рис. 6. Характерні параметри профілю елемента, що витискується

Для оцінки деформовності матеріалу заготовки та визначення граничних розмірів, з точки зору запобігання руйнуванню матеріалу або забезпечення необхідних технічних характеристик деталі, необхідно мати шляхи деформування часток небезпечних зон. На рис. 7 приведені шляхи деформування часток матеріалу заготовки в найбільш деформованих зонах, отримані методом координатних подільних сіток з використанням теорії R -функцій.

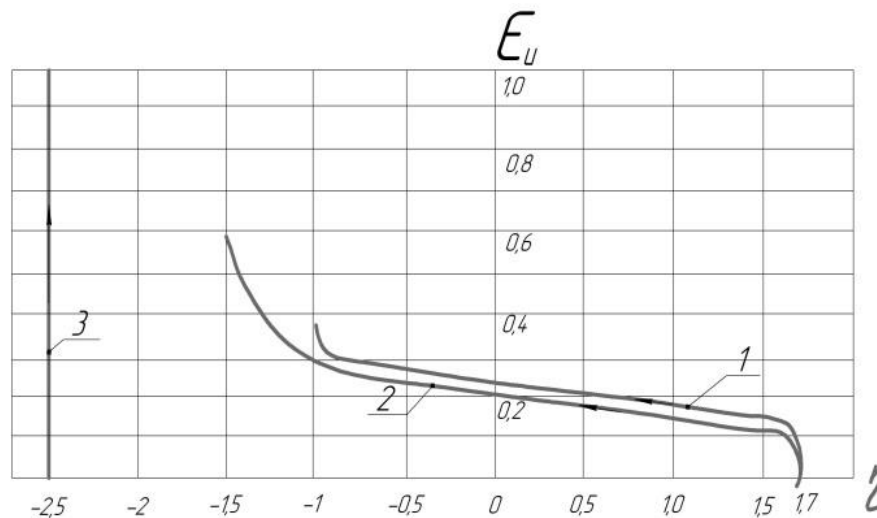


Рис. 7. Шляхи деформування часток матеріалу заготовки в найбільш деформованих зонах: 1 – посередині бічної поверхні АС; 2 – на вході в формоутворюючий канал (поблизу точки А); 3 – в зоні контакту заготовки з валком

Особливість шляхів деформування полягає у тому, що на початковому етапі видавлювання матеріал на лінії ОМ підлягає розтягу при показнику напруженого стану $\eta = 1,73$. При цьому величина інтенсивності деформацій є незначною, досягаючи для вільної поверхні на заключному етапі формоутворення значень $\epsilon_i = 0,15 - 0,2$. В подальшому, при контакті з бічною поверхнею каналу матриці, деформування продовжується в умовах $\eta = -1,0 - -1,5$. Для найбільш деформованої приконтатної з валком зони заготовки шлях деформування 3 можна представити за середнім в зоні натискання валка значенням показника $\eta = -2,5 \dots -2$.

Вибір критеріального підходу для оцінки деформовності матеріалу заготовок при ШО залежить, головним чином, від виду деформування: просте чи складне. При прямому видавлюванні методом ШО шляхи деформування мають відзначену вище особливість.

Побудова математичної моделі деформовності небезпечних зон заготовки передбачає побудову відповідних шляхів деформування. Для моделювання шляхів деформування, що зображені траєкторіями 1, 2 на рис. 7 нами сконструйована параметрично задана функція

$$\begin{cases} \eta(t) = \frac{b \cdot (\operatorname{tg}(t) - t) + a \cdot \sqrt{1 + c \cdot t}}{\sqrt{\operatorname{tg}^2(t) + c \cdot t^2}}, & t \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right), \\ \bar{e}_{eq}(t) = m \cdot \int_0^t \sqrt{\frac{1}{\cos^4 x} + 3} \cdot dx \end{cases}, \quad (1)$$

де a, b, c, m – параметри апроксимації.

Перевіримо, чи задовольняє запропонована модель шляхів деформування деяким граничним умовам:

$$1. \quad \lim_{t \rightarrow 0^+} \eta(t) = 1.7. \quad (2)$$

$$2. \lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}-0} \eta(t) = -1.5 \div -1. \quad (3)$$

1.

Дійсно, для першої умови маємо

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow 0+} \eta(t) &= \lim_{t \rightarrow 0+} \frac{b \cdot (\operatorname{tg}(t) - t) + a \cdot \sqrt{1+c} \cdot t}{\sqrt{\operatorname{tg}^2(t) + c \cdot t^2}} = \\ &= \lim_{t \rightarrow 0+} \frac{b \cdot \frac{\operatorname{tg}(t)}{\operatorname{tg}(t)} + (a \cdot \sqrt{1+c} - b) \cdot \frac{t}{\operatorname{tg}(t)}}{\sqrt{\frac{\operatorname{tg}^2(t)}{\operatorname{tg}^2(t)} + c \cdot \frac{t^2}{\operatorname{tg}^2(t)}}} \end{aligned} \quad (4)$$

З урахуванням першої визначної границі

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{\sin(t)}{t} = 1 \quad \text{та умови} \quad \lim_{t \rightarrow 0} \cos(t) = 1,$$

Матимемо

$$\lim_{t \rightarrow 0+} \eta(t) = a. \quad (5)$$

Звідси випливає, що параметр a дорівнює $a = 1.7$.

Для другої умови на основі (1) можемо записати

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}-0} \eta(t) &= \lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}-0} \frac{b \cdot (\operatorname{tg}(t) - t) + a \cdot \sqrt{1+c} \cdot t}{\sqrt{\operatorname{tg}^2(t) + c \cdot t^2}} = \\ &= \lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}-0} \frac{b \cdot \frac{\operatorname{tg}(t)}{\operatorname{tg}(t)} + (a \cdot \sqrt{1+c} - b) \cdot \frac{t}{\operatorname{tg}(t)}}{\sqrt{\frac{\operatorname{tg}^2(t)}{\operatorname{tg}^2(t)} + c \cdot \frac{t^2}{\operatorname{tg}^2(t)}}} \end{aligned} \quad (6)$$

З урахуванням того, що $\lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}-0} \frac{t}{\operatorname{tg}(t)} = 0$,

Матимемо

$$\lim_{t \rightarrow \frac{\pi}{2}-0} \eta(t) = b. \quad (7)$$

Отже вибір значення параметра b з діапазону, що вказаний в граничній умові, визначає стадію процесу деформування заготовки під час її контакту з бічною поверхнею каналу матриці.

Неважко показати, також, що

$$\lim_{c \rightarrow 0^+} \eta(t) = b + (a - b) \cdot \frac{t}{\operatorname{tg}(t)}, \quad \lim_{c \rightarrow +\infty} \eta(t) = a.$$

В певній мірі, вплив вибору конкретного значення цього параметра на форму траєкторії деформування може бути відображений вибором відповідного значення параметра m

На рис. 8. відображено вплив вибору значень параметрів функції на форму траєкторії деформування.

Для оцінки деформовності матеріалу заготовок на основі критерію В. Огороднікова [9] була побудована модель накопичення пошкоджень у вигляді

$$\psi(t) = \int_0^t \frac{n \cdot m^n \cdot \left(\int_0^x \sqrt{\frac{1}{\cos^4 \tau} + 3} \cdot d\tau \right)^{n-1}}{(\varepsilon_{*s}[\eta(x)])^n} \cdot \sqrt{\frac{1}{\cos^4 x} + 3} \cdot dx, \quad (8)$$

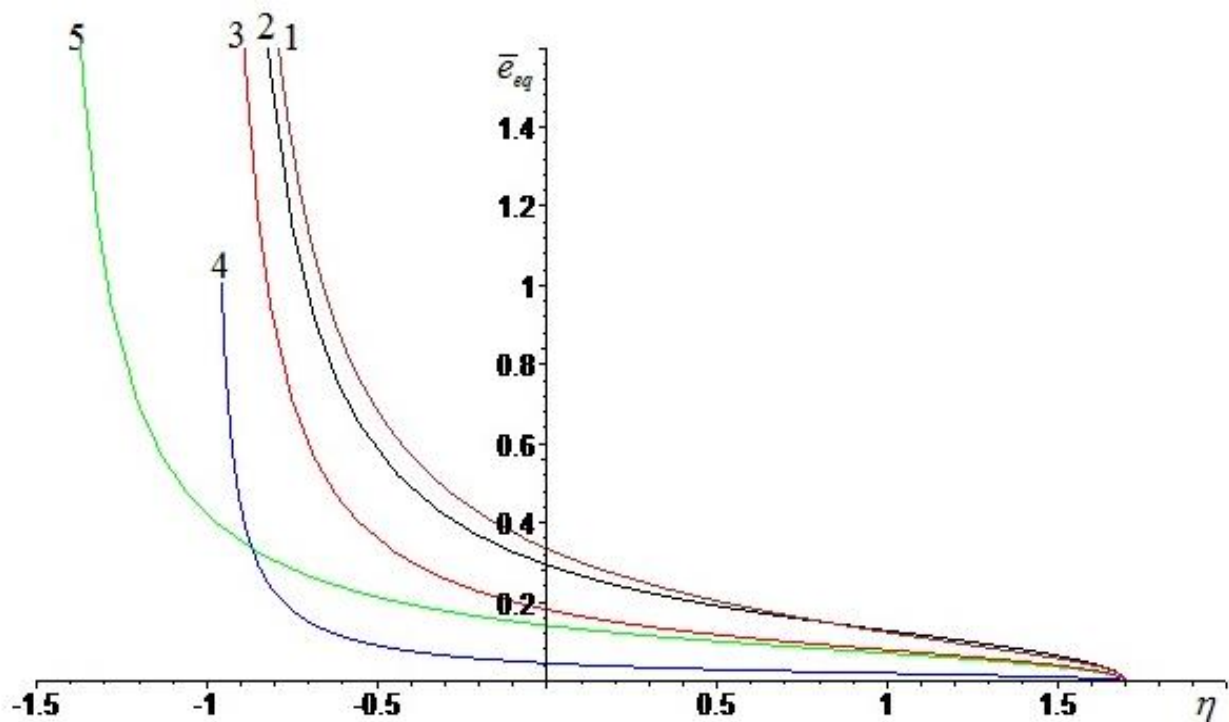


Рис. 8. Траєкторії деформування: розрахунки за (4.11), $a = 1.7$; 1÷4 - $b = -1$; 5 - $b = -1.5$; 2, 3, 4 - $c = 0.1$; 1 - $c = 30$; 1 - $c = 0.08$; 1÷5 - $m = 0.02, 0.065, 0.04, 0.01, 0.04$.

$$n = 1 + 0.2 \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{d\eta}{d\bar{e}_{eq}} \right). \quad (9)$$

Використовуватимемо трипараметричну апроксимацію кривої граничних деформацій при стаціонарному деформуванні:

$$\varepsilon_{*s}(\eta) = \varepsilon_{*s}(\eta = 0) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta = 1)}{\varepsilon_{*s}(\eta = -1)} \right)^{\frac{\eta}{2}} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{*s}(\eta = -1) \cdot \varepsilon_{*s}(\eta = 1)}{[\varepsilon_{*s}(\eta = 0)]^2} \right)^{\frac{\eta^2}{2}}, \quad (10)$$

Тоді крива накопичення пошкоджень в координатах $\eta - \psi$ набуває такого вигляду

$$\left\{ \begin{aligned} \eta(t) &= \frac{b \cdot (\operatorname{tg}(t) - t) + a \cdot \sqrt{1+c} \cdot t}{\sqrt{\operatorname{tg}^2(t) + c \cdot t^2}}, \\ \psi(t) &= \int_0^t \frac{n \cdot m^n \cdot \left(\int_0^x \sqrt{\frac{1}{\cos^4 \tau} + 3} \cdot d\tau \right)^{n-1} \cdot \sqrt{\frac{1}{\cos^4 x} + 3}}{\left(\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta = 0) \cdot \left(\frac{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta = 1)}{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta = -1)} \right)^{\frac{\eta(x)}{2}} \cdot \left(\frac{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta = 1) \cdot \bar{\varepsilon}_{fs}(\eta = -1)}{\varepsilon_{fs}^2(\eta = 0)} \right)^{\frac{\eta^2(x)}{2}} \right)^n} \cdot dx, \end{aligned} \right. t \in \left[0, \frac{\pi}{2} \right], \quad (11)$$

Похідна $\frac{d\eta}{d\bar{\varepsilon}_{eq}}$ визначається, як похідна параметрично заданої функції (1). В результаті,

модель (8), (11) набуває доволі громіздкого вигляду.

Аналіз траєкторій деформування, що зображені на рис. 7, свідчить, що на початковій стадії деформування, що супроводжується різкою зміною напруженого стану від 1.7 до від'ємних значень, швидкість $\frac{d\eta}{d\bar{\varepsilon}_{eq}}$ можна вважати сталою та яка різних траєкторій змінюється при-

близно в діапазоні від -17 до -4. У цьому випадку, відповідно до (9), значення параметра нелінійності n належить діапазону 0.69÷0.73.

На заключній стадії деформування, відповідно до форми траєкторій деформування, показник напруженого стану майже не змінюється на тлі значного збільшення накопиченої деформації. Отже, розрахункова величина накопичення пошкоджень на цій стадії практично не залежить від значення показника нелінійності накопичення пошкоджень n . Це означає, що моделювання деформовності при прямому видавлюванні методом штампування обкочуванням можна здійснювати за умови $n = n_i = \text{const}$.

При $n=1$ – матимемо лінійний принцип накопичення пошкоджень, відповідно якого на основі (11) матимемо

$$\left\{ \begin{aligned} \eta(t) &= \frac{b \cdot (\operatorname{tg}(t) - t) + a \cdot \sqrt{1+c} \cdot t}{\sqrt{\operatorname{tg}^2(t) + c \cdot t^2}}, \\ \psi(t) &= m \cdot \int_0^t \frac{\sqrt{\frac{1}{\cos^4 x} + 3}}{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta = 0) \cdot \left(\frac{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta = 1)}{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta = -1)} \right)^{\frac{\eta(x)}{2}} \cdot \left(\frac{\bar{\varepsilon}_{fs}(\eta = 1) \cdot \bar{\varepsilon}_{fs}(\eta = -1)}{\varepsilon_{fs}^2(\eta = 0)} \right)^{\frac{\eta^2(x)}{2}}} \cdot dx, \end{aligned} \right. t \in \left[0, \frac{\pi}{2} \right], \quad (12)$$

Результати моделювання деформовності за вказаних умов показано на рис. 9.

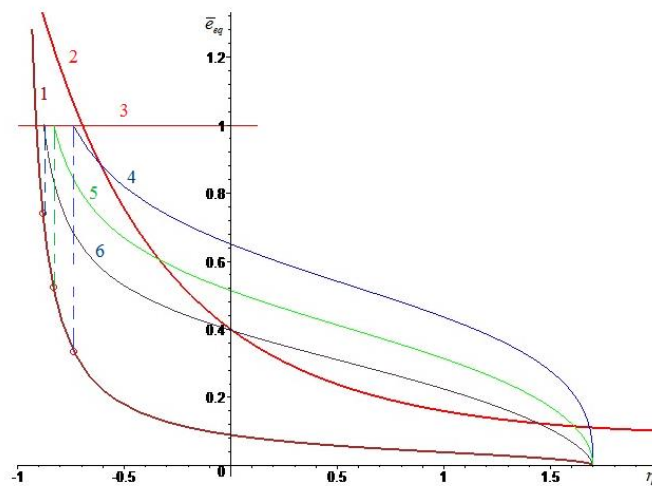


Рис. 9. Дослідження деформовності матеріалу заготовок при прямому витискуванні методом ШО:

1 – траєкторія деформування (1), $a = 1.7$, $b = -1$, $c = 0.08$, $m = 0.02$; 2 – крива граничних деформацій сталі 14X17H2 – розрахунок за (11) при $\varepsilon_{*s}(\eta = -1) = 1.6$, $\varepsilon_{*s}(\eta = 0) = 0.4$, $\varepsilon_{*s}(\eta = 1) = 0.16$; 4, 5, 6 – криві накопичення пошкоджень – розрахунок за (11) при $n = 0.73, 1, 1.27$; o – розрахункові значення граничної деформації

Із представлених даних видно, що розрахункові значення координат критичних точок для досліджуваної траєкторії деформування нехтовно мало відрізняються один від одного за значенням показника напруженого стану η та суттєво відрізняються за величиною граничної деформації. В усіх випадках розрахункові значення граничної деформації в 2 ÷ 4 рази менше, ніж значення накопиченої деформації в точці перетину розглядуваної траєкторії з кривою граничних деформацій при стаціонарному навантаженні.

ВИСНОВКИ

1. В роботі проведено розробку і дослідження технологічної схеми прямого вдавлювання методом штампування обкочуванням, в результаті чого доведено, що даний процес дозволяє отримувати складнопрофільні заготовки високої якості.

2. Можливості прямого вдавлювання методом ШО обмежені складністю передачі зусилля від валка на протилежну торцеву частину заготовки, та значними контактними напруженнями. Тому дана операція підходить більш для здійснення калібрування або формування незначних за розміром елементів заготовки.

3. За результатами дослідження напружено-деформованого стану матеріалу заготовок при прямому видавлюванні методом ШО, побудови кривих граничних деформацій та з дослідження деформовності матеріалу заготовок впливає, що у порівнянні з лінійним принципом накопичення пошкоджень, розрахунок за моделлю, що базується на критерії В. А. Огороднікова знижує розрахункові значення граничної деформації. В той же час призначення параметру нелінійності накопичення пошкодження значень (9), що задовольняють умову $n > 1$, призводить до підвищення розрахункового значення граничної деформації у порівнянні з лінійним принципом накопичення пошкоджень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Матвийчук В. А., Алиев И. С. Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов: монография. Краматорск: ДГМА. 2009. 268 с.
2. Алієв І. С. Методи пошуку нових технологічних способів видавлювання. Теорія та практика обробки матеріалів тиском. Колективна монографія. Запоріжжя: Мотор-Січ. 2016. С. 364-485. ISBN 978-966-2906-60-8.

3. Алиева Л. И., Жбанков Я. Г. Перспективы развития процессов точной объемной штамповки. *Вісник ДДМА: зб. наук. праць*. Краматорськ: ДДМА. 2008. 1 (11). С. 13–19.
4. Виноградов Л. В., Матвийчук В. А., Мочалов С. М. Технологические возможности ротационного деформирования. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1989. 4. С. 14–16.
5. Краєвський В. О., Матвійчук В. А., Михалевич В. М. Вплив технологічних параметрів на кінематику холодного торцевого розкочування. *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії*. Краматорськ-Слов'янськ. 2003. С. 286–291.
6. Матвійчук В. А., Колісник М. А., Любін М. В. Розробка і дослідження процесів штампування обкочуванням складно профільних заготовок. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018. 4(103). С. 56–63.
7. Карнаух С. Г., Алієв І. С., Матвійчук В. А., Таган Л. В. Розробка штампів з диференційним затиском для різання заготовок під точне штампування. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. 4 (115). С. 66–74.
8. Матвійчук В. А., Колісник М. А., Штуць А. А. Дослідження напружено-деформовного стану матеріалу заготовок при прямому витискуванні методом штампування обкочування. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018. № 3(102). С. 77–84.
9. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. Киев: Вища школа. 1983. С. 175.
10. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости. Москва: Машиностроение. 1971. 200 с.
11. Gundebommu S. L., Matvijchuk V., Rubanenko O., Branitskiy Yu. Justification and development of methods building curves boundary deformation of metals. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 38, pp. 3337–3344.
12. Matvijchuk V., Shtuts A., Kolisnyk M., Kupchuk I., Derevenko I. Investigation of the tubular and cylindrical billets stamping by rolling process with the use of computer simulation. *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering*. 2022. 1 (66), pp. 51–58.
13. Kupchuk I., Kolisnyk M., Shtuts A., Paladii M. Development of the technological process of forming rings from sheet samples by stamping rollers and rotary hood. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series I: Engineering Sciences*. 2021. 14 (63). 2, pp. 1–13.

REFERENCES

2. Matvijchuk V. A., Aliiev I. S. Improvement of processes of local rotational processing by pressure on the basis of the analysis of deformability of metals: monograph. Kramatorsk: DSEA. 2009. 268 p. [in Russian].
3. Aliiev I.S. Methods to search for new technological methods of visualization. Theory and practice of processing materials with a vice. Collective monograph. Zaporizhzhya: Motor-Sich. 2016. S. 364-485. ISBN 978-966-2906-60-8. [in Ukrainian].
4. Aliieva L.I., Zhbakov. Ya.G. Prospects for the development of precision forging processes. *Bulletin of DSEA*. Kramatorsk: DSEA. 2008. 1(11), pp. 13–19. [in Russian].
5. Vinogradov L.V., Matvijchuk V.A., Mochalov S.M. Technological possibilities of rotational deformation. *Forging and stamping production*. 1989. 4. S. 14-16.
6. Kraevskiy V.O., Matvijchuk V.A., Mikhalevich V.M. Influence of technological parameters on the kinematics of cold end rolling. *Improvement of pressure treatment processes and equipment in mechanical engineering and metallurgy*. Kramatorsk-Slovyansk. 2003, pp. 286–291. [in Ukrainian].
7. Matvijchuk V.A., Kolisnyk M.A., Lyubin M.V. Development and research of processes of stamping by rolling of complex profile blanks. *Engineering, energy, transport of agro-industrial complex*. 2018. 4(103), pp. 56-63. [in Ukrainian].
8. Karnaukh S.G., Aliiev I.S., Matvijchuk V.A., Tahan L.V. Development dies with a differential seal for cutting blanks for exact stamping. *Engineering, energy, transport of agro-industrial complex*. 2021. 4 (115), pp. 66-74.
9. Matvijchuk V.A., Kolisnyk M.A., Shtuts A.A. Investigation of the stress-strain state of the workpiece material during direct extrusion by rolling stamping. *Engineering, energy, transport of agro-industrial complex*. 2018. 3 (102), pp. 77-84. [in Ukrainian].
10. Ogorodnikov V.A. Estimation of deformability of metals during pressure treatment. Kyiv: Higher school. 1983. 175 p. [in Russian].
11. Del G.D. Determination of stress in the plastic region by hardness distribution. Moscow: Mechanical engineering. 1971. 200 p. [in Russian].
12. Gundebommu L., Matvijchuk V., Rubanenko O., Branitskiy Yu. Justification and development of methods building curves boundary deformation of metals. *Materials Today: Proceedings*. 2021. 38, pp. 3337–3344.
13. Matvijchuk V., Shtuts A., M. Kolisnyk., Kupchuk I., Derevenko I. Investigation of the tubular and cylindrical billets stamping by rolling process with the use of computer simulation. *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering*. 2022. 1 (66), pp. 51–58.
14. Kupchuk I., Kolisnyk M., Shtuts A., Paladii M. Development of the technological process of forming rings from sheet samples by stamping rollers and rotary hood. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series I: Engineering Sciences*. 2021. 14 (63). 2, pp. 1-13.

Mikhalevich V., Matviychuk V., Kolisnyk M. Assessment of the deformation of the billet material in the direct expression by the roll stamping method

The article presents the results of the development and research of the technological scheme of direct extrusion by the method of stamping by rolling with a conical roll for obtaining complex profile blanks. Since the technological possibilities depend on the deformability of the material, the stress-strain state of the workpieces was analyzed using the mesh method, hardness measurement, and microstructural analysis. The main result of the analysis was the construction of the paths of deformation of the parts of the material of the workpieces in the coordinates "intensity of deformations - an indicator of the stressed state". Zones of workpieces that are deformed under the conditions of a "hard" stress state have been identified, so it is precisely for these zones that an assessment of the deformability of metals has been carried out. To assess the deformability of the material of the workpieces, a damage accumulation model was built based on V.A. Ogorodnikov's criteria and a certain technique for constructing the approximation of the limit deformation curve. From the results of the study of the deformability of the workpiece material, it follows that, compared to the linear principle of accumulation of damage, the calculation based on the model based on V.A. Ogorodnikov's criteria reduces the calculated value of the ultimate deformation. At the same time, setting the non-linearity parameter of damage accumulation to values $n > 1$ that satisfy the condition leads to an increase in the calculated value of the limit strain compared to the linear principle of damage accumulation.

Key words: complex profile workpiece, rolling stamping, conical roll, direct extrusion, stress-strain state, deformability.

Михалевич В. М., Матвійчук В. А., Колісник Н. А. Оценка деформируемости материала заготовок при прямом выдавливании методом штамповки обкаткой.

В статье приведены результаты разработки и исследования технологической схемы прямого выдавливания методом штамповки обкаткой коническим валком для получения сложнопрофильных заготовок. Поскольку технологические возможности при этом зависят от деформируемости материала, проведен анализ напряженно-деформированного состояния заготовок с использованием метода сеток, измерения твердости и микроструктурного анализа. Главным результатом анализа стало построение путей деформирования частиц материала заготовок в координатах «интенсивность деформаций – показатель напряженного состояния». Установлены зоны деформируемых заготовок в условиях «жесткого» напряженного состояния, поэтому именно для этих зон проведена оценка деформируемости металлов. Для оценки деформируемости материала заготовок построили модель накопления повреждений, основанную на критерии В.А. Огородникова и определенной методики построения аппроксимации кривой предельных деформаций. Из результатов исследования деформируемости материала заготовок следует, что по сравнению с линейным принципом накопления повреждений расчет по модели, базирующейся на критерии В.А. Огородникова снижает расчетное значение предельной деформации. В то же время назначение параметра нелинейности накопления повреждений удовлетворяющих $n > 1$ условию значений приводит к повышению расчетного значения предельной деформации по сравнению с линейным принципом накопления повреждений.

Ключевые слова: сложно профилированная заготовка, штамповка обкаткой, конический валок, прямое выдавливание, напряженно-деформированное состояние, деформируемость.

Михалевич Володимир Маркусович – д-р техн наук, професор ВНАУ

Михалевич Владимир Маркусович – д-р техн- наук, профессор ВНАУ.

Mikhalevich Volodymyr – Doctor of Technical Sciences, Full Professor VNAU.

E-mail: mykhalevych@vntu.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1557-7331>

Матвійчук Віктор Андрійович – д-р техн. наук, професор, зав. кафедрою ВНАУ

Матвийчук Виктор Андреевич – д-р техн- наук, профессор, зав. кафедрой ВНАУ.

Matviychuk Viktor – Dr Sc, Full Professor, Head of the Department VNAU.

E-mail: vamatv50@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7837-5174>

Колісник Микола Анатолійович – асистент ВНАУ

Колісник Николай Анатольевич – асистент ВНАУ

Kolisnyk Mykola – Assistant Professor, Department of Electric Power Engineering, VNAU.

Email: kolisnik30@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5502-6556>

ВНАУ – Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця

ВНАУ – Винницкий национальный аграрный университет, г. Винница

VNAU – Vinnitsa National Agrarian University, Vinnitsa