

**Матвійчук В.А.**

д.т.н., професор

Колісник М.А.

асистент

Штуць А.А.

асистент

**Вінницький національний
аграрний університет****Matviychuk V.**Doctor of Technical Sciences,
Professor**Kolisnyk M.**

assistant

Shtuts A.

assistant

**Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 621.77.01****DOI: 10.37128/2306-8744-2022-2-9****ПОБУДОВА КРИВИХ
ГРАНИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ
МАТЕРІАЛІВ**

В роботі проведений аналіз побудови кривих граничних деформацій металів. Встановлено, що традиційні способи випробувань, такі як осадження і розтяг циліндричних зразків, не забезпечують сталості показника напруженого стану, а отже вносять історію деформування в побудову кривих. При осаджуванні відбувається зростання показника напруженого стану внаслідок викривлення бокової поверхні зразка (утворення бочки), яке викликане тертям на торцях. А при розтягу показник напруженого стану також зростає, в результаті утворення шийки через втрату стійкості деформування. Тому були розглянуті заходи, які б забезпечили отримання достовірних результатів при побудові кривих граничних деформацій з виключенням впливу історії деформування. При осаджуванні до таких заходів відносяться використання пластичної, більш м'якої ніж матеріал зразка, фольги на торцях зразків та поетапне видалення крайок лунки на їх торцях шліфуванням або осаджуванням без фольги. Крім того, був розглянутий експериментально-розрахунковий метод, який передбачає побудову шляхів деформування та корегування граничної деформації за допомогою критерію деформовності. При розтягу, у випадку утворення шийки, приріст деформації лінійно залежить від відношення радіуса кривизни шийки до її діаметру. Приведено рівняння, за допомогою якого експериментально-розрахунковим методом можна врахувати вплив шийки на підвищення граничної деформації. Для експериментального визначення граничної деформації при розтягу запропоновано спосіб вальцювання циліндричних зразків на клин валками, радіуси яких зростають в процесі вальцювання, що дозволяє усунути появу шийки. З достатньою для практики точністю криві граничних деформацій можна будувати за результатами випробування зразків на кручення і осаджування, а значення граничних деформацій при розтягу отримувати з використанням апробованих для різних металів апроксимуючих залежностей. За приведеною методикою, включаючи визначення пластичності вальцюванням, були побудовані криві граничних деформацій низки сталей.

Ключові слова: криві граничних деформацій, стиск, розтяг, вальцювання зразків на клин.

Вступ Сучасна металообробка передбачає необхідність забезпечення високої ефективності виробництва, що обумовлює широке застосування у якості заготівельних операцій процесів обробки металів тиском (ОМТ). Особливе місце серед них посідають процеси холодного деформування, проте їх впровадження обмежується переважно небезпекою руйнування металів. Оцінку деформовності матеріалу заготовок, тобто здатності до формозміни

методами ОМТ без руйнування, можна проводити за відомими критеріями [1, 2], однак для цього необхідно мати достовірні криві граничних деформацій матеріалів, побудованих для різних показників напруженого стану. Дослідження показали, що в більшості процесів ОМТ реалізується напружений стан, що знаходиться між лінійним стиском і розтягом, тому саме ця область і викликає найбільший інтерес з позицій оцінки деформовності матеріалу заготовок [3]. До



того ж для області з більш м'яким, порівняно з одноосним стиском, напруженим станом, характерні сприятливі умови деформовності зі значно меншим ризиком руйнування. А області з більш жорстким, порівняно з одноосним розтягом, напруженим станом, характерні переважно для листового штампування і більше уваги потребують саме з позицій запобігання місцевому потоншанню (шийці), а не класичному утворенню тріщин.

Таким чином, при оцінці деформовності металів в більшості процесів ОМТ для побудови кривих граничних деформацій достатньо провести їх випробування на стиск, кручення і розтяг. Проте при цьому виникає ряд труднощів, які обумовлені тим, що криві граничних деформацій необхідно будувати при постійних значеннях показника напруженого стану. Проте при осадженні циліндричних зразків лінійний напружений стан втрачається внаслідок тертя на торцях і появи бочки, а при розтягу – внаслідок втрати стійкості деформування і утворення шийки. Отримані таким чином результати включають історію деформування, а отже не цілком придатні для побудови кривих граничних деформацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підвищення пластичності при розтягу, у разі утворення шийки, пояснюється у роботі [4] появою складного деформування. Надалі, під складним деформуванням будемо розуміти випадок, при якому напрямний тензор швидкостей деформацій $\beta_{ij}(\epsilon_u) \neq const$. При цьому встановлений у роботі [4] приріст деформації $\Delta \epsilon_*$ лінійно залежить від відношення радіуса кривизни шийки R до її діаметру d_u , і при $R/d_u \geq 0,5$ може бути описаний рівнянням:

$$\Delta \epsilon_* = 0,85 - 0,57 R/d_u. \quad (1)$$

Підвищення пластичності у разі осаджування зразків пояснюють виникненням тертя на торцях зразка і утворення бочки, тобто також появою складного деформування. В роботі [3] для усунення тертя рекомендується використання змащення у вигляді м'якої пластичної фольги і колоїдного графіту. Проте такі заходи лише незначною мірою зменшують тертя.

Мета та завдання дослідження. Метою даної роботи є обґрунтування, розробка і реалізація способів побудови кривих граничних деформацій металів при забезпеченні постійності показника напруженого стану.

Результати досліджень. Головним фактором, що впливає на пластичність металів в умовах холодного деформування, є схема напруженого стану. Залежність пластичності від параметрів, що характеризують схему напруженого стану, називають кривою граничних деформацій.

Найбільшого поширення набуло уявлення залежності пластичності від показника напруженого стану:

$$\eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{3\sqrt{I_2(D_\sigma)}} = \frac{3\sigma}{\sqrt{3}\sigma_u} \quad (2)$$

де $I_1(T_\sigma)$ - перший інваріант тензора напружень;

$I_2(D_\sigma)$ - другий інваріант девіатора напружень;

$$\sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij} - \text{середня напруження.}$$

Показник η не враховує впливу третього інваріанта тензора напружень, тому криву граничних напружень в координатах « $\epsilon_u - \eta$ » не вважають єдиною для всіх можливих видів напруженого стану.

Для об'єктивної оцінки деформовності металів у різних технологічних процесах необхідно мати «єдину» криву граничних деформацій, яка описує їх пластичність при різних схемах напруженого стану.

При випробуванні циліндричних зразків на осадження основна складність полягає в усуненні тертя на торцях зразків для забезпечення одноосного стиснення ($\eta = -1, \mu_\sigma = 1$). На рис. 1 показана схема осадження суцільних циліндричних зразків із забезпеченням умов лінійного стиснення.

Проте слід відзначити, що навіть при використанні ефективного мастила і прокладок з шарів м'якої фольги, лінійне стиснення реалізувати важко.

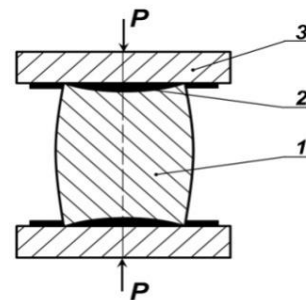


Рис. 1. Схема осадження суцільного циліндричного зразка із забезпеченням умов одноосного стиску: 1- зразок, 2-фольга, 3-інструмент

Застосування таких прийомів, як поетапне шліфування крайок лунки на торцях або вдавнення їх осадкою без фольги, з наступною поетапною осадкою із фольгою, дозволяє витримувати напружений стан близький до лінійного стиснення ($\eta = -1$) тільки до певних ступенів деформації. При цьому інтенсивність деформації в момент руйнування можна визначити із співвідношення:

$$\epsilon_* = \ln \frac{h_0}{h_*}, \quad (3)$$

де h_0 и h_* - висота вихідного зразка і в момент руйнування, відповідно.



На рис. 2 показаний вид вихідного та перетинів циліндричних зразків, осаджених до

різних ступенів за викладеною методикою, зі збереженням прямолінійності бічних поверхонь.

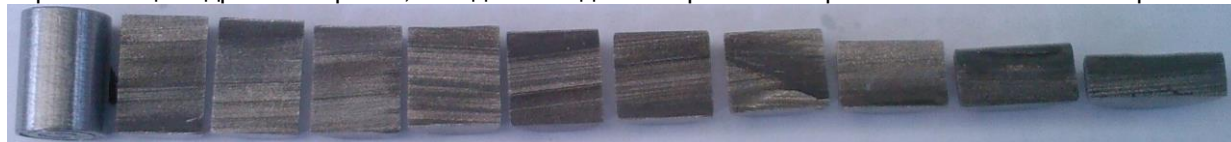


Рис. 2. Зразки для випробування на осадження: вихідний зразок та вид перетинів циліндричних зразків, осаджених в умовах одновісного стиснення

У разі спотворення циліндричної форми зразка при осадженні (поява бочки), напружений стан відрізняється від одновісного стиску. У результаті порушується умова сталості показника напруженого стану, необхідна при побудові кривих граничних деформацій.

У цьому випадку точки кривих граничних деформацій можна отримати експериментально-розрахунковим методом. Для побудови шляхів деформування частинок матеріалу, на бічну поверхню зразків, поблизу середнього по висоті перетину, на твердомірі Віккерса алмазною пірамідкою наносять чотири відбитки в чотирьох симетрично розташованих точках екватора, рис. 3.

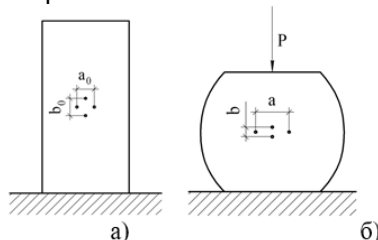


Рис. 3. Форма зразків і координатної сітки: а) до осадження, б) в процесі осадження

Осадження зразків проводять поетапно до появи видимих тріщин на екваторі бічної поверхні. Поетапно вимірюють діагоналі квадрата a_0, b_0, a_i, b_i в осьовому і окружному напрямку до і після осаджування, відповідно. За результатами вимірювань визначають осьову $\varepsilon_z = -\ln \frac{a_0}{a_i}$ і

окружну деформацію $\varepsilon_\theta = \ln \frac{b_i}{b_0}$, а також значення

інтенсивності деформацій і показника напруженого стану.

$$\varepsilon_u = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_z^2 + \varepsilon_z \varepsilon_\theta + \varepsilon_\theta^2}, \quad (4)$$

$$\eta = \sqrt{3} \frac{\varepsilon_z + \varepsilon_\theta}{\sqrt{\varepsilon_z^2 + \varepsilon_z \varepsilon_\theta + \varepsilon_\theta^2}} \quad (5)$$

Використовуючи шлях деформування частинок матеріалу, отриманий до моменту руйнування зразка, і віднімаючи розрахований за допомогою критерію деформовності [1] приріст деформації, обумовлений історією деформування, визначають точку на кривій граничних деформацій. Тобто вирішують завдання, зворотне оцінці деформовності матеріалу.

В роботі [5] залежність між компонентами деформації і її приростами представлена у вигляді:

$$\Phi \left(\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\theta}, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z \right) = 0 \quad (6)$$

Апроксимації у вигляді диференційного рівняння у вигляді:

$$\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_\theta} = -\frac{1}{2} - \frac{3}{2} * \frac{m^2}{\varepsilon_\theta^2 + m^2}, m > 0 \quad (7)$$

Апроксимації у вигляді рішення відповідного диференційного рівняння:

$$\varepsilon_z = -\frac{1}{2} * \varepsilon_\theta - \frac{3}{2} * m * \operatorname{arctg} \left(\frac{\varepsilon_\theta}{m} \right) \quad (8)$$

Аналітичне представлення траєкторії деформацій в координатах $\varepsilon_u - \eta$ має вигляд:

для накопиченої пластичної деформації:

$$\varepsilon_u(t, m) = m * \int_0^t \sqrt{3 + \frac{1}{\cos^4(x)}} * dx, t \in \left[0, \frac{\pi}{2} \right] \quad (9)$$

Для показника напруженого стану:

$$\eta(t) = \frac{1 - 3 \cos^2(t)}{\sqrt{1 + 3 \cos^4(t)}}, t \in \left[0, \frac{\pi}{2} \right] \quad (10)$$

Крива граничних деформацій при стаціонарному деформуванні:

$$\varepsilon_c(\eta) = a_2 * \exp \left(-\eta * \ln \left(\frac{(1-\eta) * a_1}{2 * a_2} + \frac{(1-\eta) * a_2}{2 * a_3} \right) \right), \eta \in [-1, 1] \quad (11)$$

Модель граничного стану має вигляд:

$$\begin{cases} \eta = \omega(\tau_c(m)) \\ \varepsilon_c(\tau_c(m), m) = m * \int_0^{\tau_c(m)} \frac{1}{f(2, \tau) * \cos^2(\tau)} \end{cases} \quad (12)$$

$$\frac{m}{a_2} * \int_0^{\tau_c(m)} \frac{\exp \left[\omega(\tau) * \ln \left(a_1 * \frac{1-\omega(\tau)}{2 * a_2} + a_2 * \frac{1+\omega(\tau)}{2 * a_3} \right) \right]}{f(2, \tau) * \cos^2(\tau)} * dt - 1 = 0$$

На рис. 4 представлена залежність граничного стану матеріалу від інтенсивності бочкоутворення при осадженні [5].

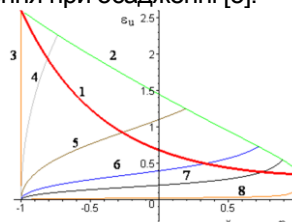
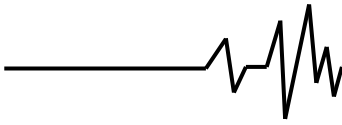


Рис. 4. Залежність граничного стану матеріалу від інтенсивності бочкоутворення при осадженні: 3-8 траєкторії деформування, де 3 – m=30; 4 – 2; 5 – 0,5; 6 – 0,18; 7 – 0,09; 8 – 0,01



Перевагою кручення, при випробуванні металів на пластичність, є той факт, що в процесі кручення циліндричних зразків напруження $\sigma_1 = -\sigma_3$, а $\sigma_2 = 0$. Таким чином при випробуванні витримуються постійні значення показників напруженого стану $\eta = 0$ і $\mu_\sigma = 0$, де μ_σ параметр Надаї-Лоде. Інтенсивність деформацій на поверхні зразка визначається співвідношенням.

$$\varepsilon_u = \frac{tg\alpha}{\sqrt{3}}, \quad (13)$$

де α - кут зсуву, що вимірюється між вихідним і поточним положенням профільної риски на поверхні закрученого циліндричного зразка. При визначенні граничної деформації в момент руйнування зразка, вимірювання кута α слід проводити безпосередньо біля місця руйнування.

В результаті досліджень було встановлено, що криві граничних деформацій з необхідною для практики точністю, можна будувати за результатами випробування зразків на кручення і осаджування, а значення граничних деформацій при розтягуванні отримувати з використанням апробованої для різних металів апроксимуючої залежності В. А. Огороднікова [1]:

$$\varepsilon_* = \varepsilon_*(\eta = 0) \exp \left[-\eta \ln \frac{\varepsilon_*(\eta = -1)}{\varepsilon_*(\eta = 0)} \right], \quad (14)$$

де $\varepsilon_*(\eta = -1)$ і $\varepsilon_*(\eta = 0)$ - граничні деформації при лінійному стисненні і крученні циліндричних зразків, відповідно.

Слід зазначити, що поява місцевого потоншення на заготовках в процесах обробки тиском є ознакою браку, тому за граничну деформацію цілком обґрунтовано приймається величина граничної рівномірної деформації до моменту утворення шийки ε_p . Якщо ж заготовки в технологічних процесах руйнуються без утворення шийки, то для об'єктивної оцінки деформованості можна використовувати значення пластичності, отримані за результатами розтягування. При цьому необхідно враховувати підвищення пластичності, що обумовлене утворенням шийки і визначається залежністю (1).

Підвищення точності визначення пластичності при напруженому стані, що відповідає одновісному розтягу $\varepsilon_*(\eta = +1)$, за рахунок запобігання втраті стійкості деформування зразка у вигляді утворення шийки та забезпечення сталості значень показників напруженого стану протягом всього процесу випробування, можна забезпечити шляхом вальцювання заготовок до руйнування [6].

Згідно з відзначеним способом деформування вільної бічної поверхні циліндричного зразка в умовах одновісного розтягу відбувається при його вальцюванні валками, а

збільшення ступеня деформації та доведення матеріалу до руйнування забезпечується внаслідок зростання радіусів валків по мірі вальцювання та деформуванням зразка на клин.

На рис. 5 показано вальцювання зразка на клин валками, радіуси яких зростають. Відповідно до способу, дослідний циліндричний зразок 1, з нанесеною на його бічну поверхню подільною сіткою, закріплюється в утримувачі 3 і поблизу утримувача обтискується валками 2 при найменших радіусах їх поперечних перерізів. Вмикається обертання валків і здійснюється вальцювання заготовки на клин внаслідок зростання радіуса валків. Пластичність визначається за величиною деформації в момент появи тріщин на вільній поверхні зразка.

У випадку необхідності отримання за одне випробування двох значень пластичності металу при різних (але постійних в процесі деформування) показниках напруженого стану η , здійснюють вальцювання на клин криволінійного зразка.

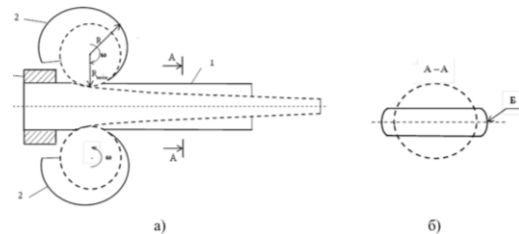


Рис. 5. Схематичне зображення процесу вальцювання на клин а); переріз деформованої заготовки; б) Б – поверхня контролю за деформаціями і руйнуванням

Для цього вальцювання проводять конічними валками, радіуси яких зростають по мірі вальцювання зразка. При цьому менше здеформована внутрішня бічна поверхня зразка матиме менше значення показника η , а більше здеформована зовнішня поверхня зразка матиме більше значення показника η (рис. 6) [6].

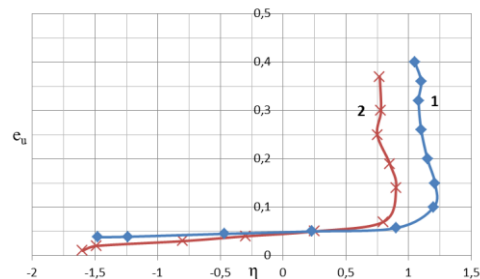


Рис. 6. Траєкторії шляхів деформування точки зовнішньої 1 та внутрішньої 2 вільних бічних поверхнь заготовки

Таким чином, описаний спосіб забезпечує можливість випробування циліндричних зразків при сталому напруженому стані в процесі деформування та отримання



двох значень пластичності за одне випробування при різних постійних значеннях

показника напруженого стану.

В табл. 1 приведені граничні деформації металів при осадженні $\varepsilon_*(\eta = -1)$, крученні $\varepsilon_*(\eta = 0)$ і коефіцієнт чутливості пластичності до показника напруженого стану λ .

Таблиця 1. Граничні деформації металів при осадженні $\varepsilon_*(\eta = -1)$, крученні $\varepsilon_*(\eta = 0)$ і коефіцієнт чутливості пластичності до показника напруженого стану λ

№ з/п	Матеріал	$\varepsilon_*(\eta = -1)$	$\varepsilon_*(\eta = 0)$	$\lambda = \frac{\varepsilon_*(\eta = -1)}{\varepsilon_*(\eta = 0)}$
1.	Сталь У10А	0,63	0,26	2,4
2.	Сталь У8	1,1	0,3	3,7
3.	Сталь У8А	1,34	0,39	3,4
4.	Сталь Р18	1,15	0,4	2,9
5.	Сталь 45	1,1	0,4	2,8
6.	Сталь І4ХІ7Н2	1,6	0,44	3,6
7.	Сталь Р6М5	0,98	0,45	2,2
8.	Сталь 30ХМА	2,0	0,48	4,2
9.	Сталь 9ХС	1,2	0,5	2,4
10.	Сталь 30ХГСА	2,0	0,5	4,0
11.	Сталь 20ХГСА	2,15	0,55	3,9
12.	Сталь 35	1,63	0,53	3,1
13.	Сталь ШХ-15	1,95	0,61	3,2
14.	Сталь 10	2,67	0,67	4,0
15.	Сталь 40ХН2МА	1,53	0,76	2,0
16.	Сталь 4ХІ3	3,3	0,84	4,0
17.	Сталь 40Х	1,5	0,86	1,7
18.	Сталь 4Х5В24С	2,0	0,91	2,2
19.	Сталь І2ХІ8НІОТ	3,0	1,15	2,6
20.	Сталь ЛС 59-І	0,72	0,56	1,3
21.	Сталь Л621	1,75	0,59	3,0
22.	Мідь М0б	12,0	4,1	2,9
23.	Сталь ДІТ	0,6	0,28	2,1
24.	Сталь ДІ6	1,21	0,4	3,0
25.	Сталь ДІ6-Т	0,9	0,42	2,1
26.	Сталь АМг-5В	1,3	0,95	1,4
27.	Сталь АМц	2,56	1,54	1,7

На рис. 7 приведені криві граничних деформацій низки металів з використанням результатів досліджень, наведених в табл. 1 та апроксимації (14) [2].

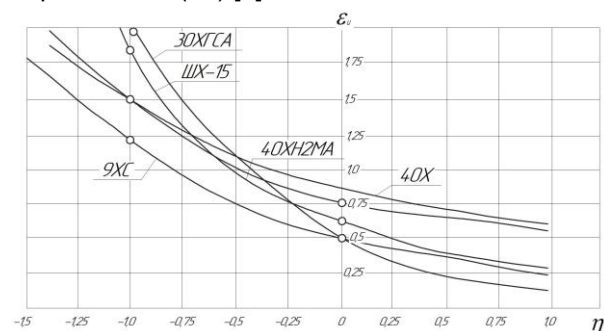


Рис. 7. Криві граничних деформацій низки сталей

Слід відзначити, що можливі неточності відображення залежності пластичності від схеми напруженого стану, при використанні плоских діаграм пластичності, характерні більше для

ділянок всебічного стиску, де небезпека руйнування металів у технологічних процесах не є основним обмежувальним фактором. Крім того, у більшості критеріїв деформовності підінтегральна функція містить модель залежності граничної деформації ε_* саме від показника η .

Тому найбільшого розповсюдження при дослідженні залежності пластичності від схеми напруженого стану отримали саме криві граничних деформацій в координатах $\varepsilon_* = \varepsilon_*(\eta)$.

Висновки. Розглянуті проблеми дослідження пластичності металів, що пов'язані з відсутністю способів побудови «єдиної» кривої граничних деформацій через утворення шийки при розтягу зразків і утворення бочки при осаджуванні та підвищення пластичності внаслідок реалізації складного деформування. Розглянуто експериментально-розрахунковий



метод, який передбачає побудову шляхів деформування при осадженні циліндричних зразків та корегування граничної деформації за допомогою критерію деформовності. Розроблено спосіб вальцювання циліндричного зразка на клин валками, радіуси яких зростають в процесі вальцювання. Спосіб забезпечує можливість випробування циліндричних зразків при сталому напруженому стані та дозволяє отримувати значення пластичності в умовах одновісного розтягу. Криві граничних деформацій, з необхідною для практики точністю, запропоновано будувати за результатами випробування зразків на кручення і осаджування з використанням апроксимуючої залежності. За приведеною методикою побудовані криві граничних деформацій низки сталей.

Список використаних джерел

1. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. Киев: Вища школа. 1983. С. 175.
2. Михалеви́ч В. М. Тензорні моделі накопичення пошкоджень. Вінниця: «УНІВЕРСУМ – Вінниця». 1998. С. 195.
3. В. А. Матвийчук., И. С. Алиев. "Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов". Краматорск: ДГМА. *Монография*. 2009.
4. Матвийчук В. А. Про підвищення пластичності металів у випадках появи шийки при розтягуванні. *Ковальсько-штампувальне виробництво • Обробка металів тиском*. 2007. № 9. С. 18-22.
5. В. М. Михалеви́ч, Ю. В. Добранюк. Аналітичне представлення максимального радіуса циліндричних заготовок під час вісесиметричного осадження із бочкоутворенням. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2015. № 1. С. 59-66.
6. В. А. Матвийчук., В. М. Михалеви́ч., Ю. В. Добранюк., І. А. Бубновська., "Спосіб визначення пластичності металів вальцюванням циліндричних зразків на клин", *МПК G01N 3/08 (2006/01)*. № 109984, Верес.26, 2016.
7. Смирнов-Аляев Г. А. Механические основы пластической обработки. *Машиностроение*. 1968. С. 272.
8. A. Shtuts, M. Kolisnyk, V. Yavdyk. Improvement of processes of rolling stamping on the basis of investigation of technological parameters on the mechanics of workpieces formation. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2018. P. 19-25.
9. Краєвський В. О., Матвийчук В. А., Михалеви́ч 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

10. Матвийчук 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.

11. Shtuts A., Kolisnyk M., Vydmysh A., Voznyak O., Baraban S., Kulakov P. Improvement of Stamping by Rolling Processes of Pipe and Cylindrical Blades on Experimental Research. *Actual Challenges in Energy & Mining*. 2020. Vol. 844. P.168-181. (Scopus SNIP: 0.29).

12. Karnaukh S. G., Markov O. E., Aliieva L. I., Kukhar V. V. Designing and researching of the equipment for cutting by breaking of rolled stock. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. № 109(9-12). pp. 2457–2464. DOI: 10.1007/s00170-020-05824-7.

References

1. Ogorodnikov V.A. (1983). Estimation of deformability of metals during pressure treatment. Kyiv: *Higher school*. С. 175. [in Ukrainian].
2. Mikhalevich V.M. (1998). Tensor models of damage accumulation. Vinnytsia: *"UNIVERSUM - Vinnytsia"*. S. 195. [in Ukrainian].
3. V.A. Matviychuk., I.S. Aliev. (2009). "Improvement of processes of local rotational processing by pressure on the basis of the analysis of deformability of metals". Kramatorsk: DGMA. *Monograph*. [in Ukrainian].
4. Matviychuk V.A. (2007). On increasing the plasticity of metals in cases of neck tension. *Forging and stamping production. Metal forming*. № 9. S. 18-22. [in Ukrainian].
5. V.M. Mikhalevich., Yu. V. Dobranyuk. (2015). Analytical representation of the maximum radius of cylindrical workpieces during axisymmetric deposition with barrel formation. *Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*. № 1. Pp. 59-66. [in Ukrainian].
6. V.A. Matviychuk., V.M. Mikhalevich., Yu. V. Dobranyuk., I.A. Bubnovskaya., "Method for determining the plasticity of metals by rolling cylindrical specimens on a wedge", *IPC G01N 3/08 (2006/01)*. № 109984, September 26, 2016. [in Ukrainian].
7. Smirnov-Alyayev G.A. (1968). Mechanical foundations of plastic processing. *Mechanical engineering*. С. 272. [in Ukrainian].
8. A. Shtuts, M. Kolisnyk, V. Yavdyk. (2018). Improvement of processes of rolling stamping on the



basis of investigation of technological parameters on the mechanics of workpieces formation. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. P. 19-25. Lublin [in Poland].

9. Kraievskiy V. O., Matviychuk, V. A., Mykhalevych, V. M. (2003). Vplyv tekhnolohichnykh parametrov na kinematyku kholodnoho tortsevoho rozkochuvannia. *Udoskonalennia protsesiv ta obladnannia obrobky tyskom v mashynobuduvanni i metalurhii*. Kramatorsk - Sloviansk. 286-291. [in Ukrainian].

10. Matviychuk V.A., Kolisnyk M.A., Shtuts A.A. (2018). Investigation of the stress-strain state of the workpiece material during direct extrusion by rolling stamping. *Engineering, energy, transport of agro-industrial complex*. № 3 (102). 77-84. [in Ukrainian].

11. Shtuts A., Kolisnyk M., Vydmysh A., Voznyak O., Baraban S., Kulakov P. (2020). Improvement of Stamping by Rolling Processes of Pipe and Cylindrical Blades on Experimental Research. *Actual Challenges in Energy & Mining*. Vol. 844. P.168-181. (Scopus SNIP: 0.29). [in Switzerland].

12. Karnaukh S. G., Markov O. E., Aliieva L. I., Kukhar V. V. (2020). Designing and researching of the equipment for cutting by breaking of rolled stock. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. № 109(9-12). pp. 2457–2464. DOI: 10.1007/s00170-020-05824-7. [in English]

CONSTRUCTION OF CURVED LIMIT DEFORMATIONS OF MATERIALS

The analysis of construction of curves of limiting deformations of metals is carried out in the work. It is established that traditional test methods, such as deposition and stretching of cylindrical specimens, do not ensure the constancy of the stress state, and therefore contribute to the history

of deformation in the construction of curves. During deposition, there is an increase in the stress state due to the curvature of the lateral surface of the sample (barrel formation), which is caused by friction at the ends. And when stretched, the stress index also increases, as a result of the formation of the neck due to the loss of resistance to deformation. Therefore, measures were considered to ensure reliable results in the construction of curves of boundary deformations, excluding the influence of the history of deformation. When settling, such measures include the use of plastic, softer than the sample material, foil at the ends of the samples and the gradual removal of the edges of the hole at their ends by grinding or deposition without foil. In addition, the experimental-calculation method was considered, which involves the construction of ways of deformation and correction of the limit deformation using the criterion of deformability. When stretching, in the case of neck formation, the increase in deformation linearly depends on the ratio of the radius of curvature of the neck to its diameter. The equation by which the experimental-calculation method can take into account the influence of the neck on the increase of ultimate deformations is given. To experimentally determine the ultimate tensile deformation, a method of rolling cylindrical specimens on a wedge with rolls whose radii increase during rolling is proposed, which eliminates the appearance of the neck. Boundary strain curves can be constructed with sufficient accuracy for torsion and deposition test specimens, and tensile strain values are obtained using approximated dependences tested for different metals.

Key words: limit deformation curves, compression, tension, rolling of specimens on a wedge.

Відомості про авторів

Матвійчук Віктор Андрійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: vamatv50@gmail.com).

Колісник Микола Анатолійович – асистент кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: kolisnik30@gmail.com).

Штуць Андрій Анатолійович – асистент кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, email: shtuts1989@gmail.com).

Matviychuk Viktor – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnitsa National Agrarian University (3 Solnechna St., Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: vamatv50@gmail.com)

Kolisnyk Mykola – Assistant Professor, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnitsa National Agrarian University (3, Solnechna str., Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: kolisnik30@gmail.com).

Andrii Shtuts – Assistant Professor, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnitsa National Agrarian University (3, Solnechna str., Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: shtuts1989@gmail.com).