



УДК 621.77.01

DOI: 10.37128/2520-6168-2021-2-3

ОЦІНКА ДЕФОРМОВНОСТІ МАТЕРІАЛУ ЗАГОТОВОК ПРИ ВАЛЬЦЮВАННІ

Михалевич Володимир Маркусович, д.т.н., професор,
Вінницький національний технічний університет
Матвійчук Віктор Андрійович, д.т.н., професор,
Бубновська Ірина Анатоліївна, асистент
Вінницький національний аграрний університет

Volodymyr Mikhalevich, Doctor of Technical Sciences, Full Professor
Vinnytsia National Technical University
Viktor Matviychuk, Doctor of Technical Sciences, Full Professor
Iryna Bubnovs'ka, Assistant
Vinnytsia National Agrarian University

В статті наведено результати розроблення і дослідження технологічного процесу холодного формувального вальцювання алюмінієвих заготовок. Основною перешкодою для впровадження таких процесів є небезпека руйнування матеріалів, що обумовило необхідність дослідження напружено-деформованого стану, пластичності і оцінки деформовності матеріалу заготовок. Для експериментального визначення пластичності металів був розроблений спосіб вальцювання, згідно з яким деформування вільної бічної поверхні циліндричного зразка відбувається в умовах одновісного розтягу. Збільшення ступеня деформації та доведення матеріалу до руйнування забезпечується внаслідок зростання радіусів валків по ходу вальцювання та деформуванням зразка на клин. Аналіз напружено-деформованого стану вільної бічної поверхні циліндричної заготовки проводили методом скінченних елементів, для чого використовувався спеціалізований інженерний програмний комплекс DEFORM 3D. У результаті встановлено суттєву неоднорідність напружено-деформовного стану в зоні деформування. Найбільш жорсткий напружений стан спостерігається на вільних бічних поверхнях заготовки, що обумовлює небезпеку її руйнування саме в цій зоні. Отримано залежність між відносним стисненням заготовки при вальцюванні та інтенсивністю деформацій на її бічній поверхні, що дозволяє попередньо визначати граничну до руйнування товщину заготовки. У результаті проведеної оцінки деформовності алюмінієвих сплавів при холодному вальцюванні, з використанням кривих граничних деформацій і скалярного критерію деформовності, визначено граничні до руйнування значення інтенсивності деформацій та граничну величину відносного стиснення заготовки. Використання побудованих моделей надає можливість визначати величину використаного ресурсу пластичності на проміжних стадіях вальцювання.

Ключові слова: *холодне формувальне вальцювання, напружено-деформований стан, пластичність, оцінка деформовності матеріалу, вальцювання на клин, інтенсивність деформацій, відносне стиснення.*

Ф. 12. Рис. 4. Літ. 13.

1. Постановка проблеми

Підвищення ефективності виробництва в машинобудуванні можливе шляхом удосконалення процесів виготовлення заготовок ще на стадії первинного формоутворення деталей. Максимальна економія матеріальних, трудових та фінансових ресурсів може відбуватися за рахунок забезпечення мінімальних розбіжностей між геометричними параметрами заготовок та розмірами готових деталей, при досягненні необхідних фізико-механічних властивостей.

У номенклатурі штампованих заготовок значний обсяг займає напівфабрикат складних видів профілів. Як підготовчу операцію для виготовлення такого напівфабрикату, з метою рівномірного перерозподілу металу при наступному штампуванні, усунення надмірної нерівномірності деформації і виготовлення якісних виробів без дефектів з високим коефіцієнтом використання металу, застосовують вальцювання. Цей процес дозволяє отримувати складно профільні вироби при значних ступенях деформації. Для низки пластичних металів цей процес доцільно здійснювати в умовах холодного деформування.



В машинобудуванні, особливо в авіаційному, виробляється значна кількість складно профільних деталей із алюмінієвих сплавів. Разом з тим, широке застосування холодного вальцювання алюмінієвих сплавів, особливо при виробництві криволінійних деталей, обмежується недостатнім розвитком розрахункового апарату оцінки деформовності матеріалу заготовок для запобігання їх руйнуванню. Тому розроблення нових схем і режимів вальцювання на основі аналізу формозміни заготовок та оцінки їх деформовності є актуальним завданням.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій

При розробленні та вдосконаленні процесів вальцювання особливо важливою є інформація про напружено-деформований стан (НДС) матеріалу заготовок і вплив на нього різних технологічних параметрів. На підставі такої інформації можна визначати силові параметри процесу, проводити оцінку деформовності матеріалу заготовок та стійкості інструментального оснащення, цілеспрямовано розширювати технологічні можливості процесу, прогнозувати службові характеристики виробів, в тому числі їх механічні характеристики: міцність, жорсткість, пластичність, витривалість, зносостійкість [1]. Найбільш об'єктивними є результати дослідження НДС матеріалу заготовок, отримані із застосуванням різних відомих методів досліджень [2], [3].

Вивченню питань розвитку процесів холодного пластичного деформування металів на основі оцінки їх деформовності присвячено низку робіт: В. А. Огородніков [4], В. М. Михалевич [5], О. В. Грушко [6].

Оцінку деформовності для калібрувального холодного вальцювання важкодеформованих титанових та хромонікелевих сплавів проводили В. А. Матвійчук [7], В. К. Смірнов [8].

Що стосується холодного формувального вальцювання металів і, зокрема, алюмінієвих сплавів, то в джерелах інформації дані про результати дослідження НДС і оцінку деформовності відсутні, що є беззаперечною перешкодою для розвитку таких процесів.

3. Мета і завдання досліджень

Метою роботи є підвищення ефективності процесів холодного формувального вальцювання заготовок із алюмінієвих сплавів за рахунок їх удосконалення шляхом розроблення нових схем і режимів вальцювання на основі аналізу напружено-деформованого стану матеріалу та оцінки його деформовності.

Завданням дослідження є розроблення методики оцінки деформовності матеріалу заготовок при холодному вальцюванні з урахуванням особливостей зміни його напружено-деформованого стану для визначення величини використаного ресурсу пластичності та граничних до руйнування розмірів заготовки.

4. Виклад основного матеріалу

Деформовність матеріалів при обробці тиском значною мірою визначається їх пластичністю і напруженим станом. Для об'єктивної оцінки деформовності металів у різних технологічних процесах доцільно мати в своєму розпорядженні «єдину» криву граничних деформацій, що описує пластичність при різних схемах напруженого стану. Під кривою граничних деформацій металу розуміють залежність $e_* = e_*(\eta)$, що отримана за умови простого або стаціонарного деформування (при якому $\beta_{ij}(e_u) = const$, $\eta(e_u) = const$, $\mu_\sigma(e_u) = const$, де e_u – інтенсивність деформацій, β_{ij} – напрямний тензор приростів деформацій, η – показник напруженого стану $\eta = I_1(T_\sigma) / \sqrt{3I_2(D_\sigma)}$, де $I_1(T_\sigma)$ і $I_2(D_\sigma)$ – перший інваріант тензора і другий інваріант девіатора напружень, μ_σ – параметр Надаї-Люде).

Для забезпечення сталості показників напруженого стану і рівномірності розподілу НДС в деформованій частині зразка при побудові кривих граничних деформацій в роботі [7] запропоновані різні способи випробування металів на пластичність. За результатами дослідження зразків на стиск, кручення, роздавання кільцевих зразків з різних металів та з використанням апроксимацій кривих граничних деформацій були отримані розрахункові значення граничної деформації $e_*(\eta = +1)$ при одновісному розтягу. Для експериментального визначення пластичності металів нами був розроблений спосіб вальцювання, згідно з яким деформування вільної бічної поверхні циліндричного зразка відбувається в умовах одновісного розтягу, а збільшення ступеня деформації та доведення матеріалу до руйнування забезпечується внаслідок зростання радіусів валків по мірі вальцювання та деформуванням зразка на клин [9].



Для аналізу напружено-деформованого стану вільної поверхні заготовки використовувався спеціалізований інженерний програмний комплекс DEFORM 3D [10], який дозволяє моделювати процеси ОМТ.

Методом скінченних елементів було отримано шляхи деформування точок заготовки на бічних поверхнях циліндричного зразка під час процесу вальцювання [11]. Подібні розрахунки вимагають значних обчислювальних робіт, що призводить до великих витрат часу. Тому була побудована аналітична модель з можливістю зміни параметрів.

Тим самим може бути досліджений вплив деяких особливостей кожної реалізації шляху деформування, а також кривої граничних деформацій матеріалу при стаціонарному деформуванні на деформовність матеріалу заготовки при вальцюванні.

Вказані шляхи деформування не є однозначними функціями:

$$\bar{e}_u = \bar{e}_u(\eta),$$

де \bar{e}_u – накопичена деформація

$$\bar{e}_u(t) = \int_0^t \dot{\epsilon}_u(\tau) \cdot d\tau,$$

$\dot{\epsilon}_u$ – інтенсивність швидкостей деформацій. Проте ці шляхи можна представити однозначними функціями виду:

$$\eta = \eta(\bar{e}_u).$$

Схематичний графік функції, що апроксимує вказані шляхи деформування, показано на рис. 1, а її структура має такий вигляд:

$$\eta = \begin{cases} \eta_0 + a_1 \cdot \bar{e}_u^s, & \bar{e}_u \leq \bar{e}_1 \\ \eta_1 + a \cdot \sin(\pi \cdot \omega \cdot (\bar{e}_u - \bar{e}_1)), & \bar{e}_u > \bar{e}_1 \end{cases} \quad (1)$$

де η_0 – значення показника напруженого стану на початку деформування; (\bar{e}_1, η_1) – координати точки переходу від першої до другої стадії деформування; a_1, a, s, ω – параметри функції.

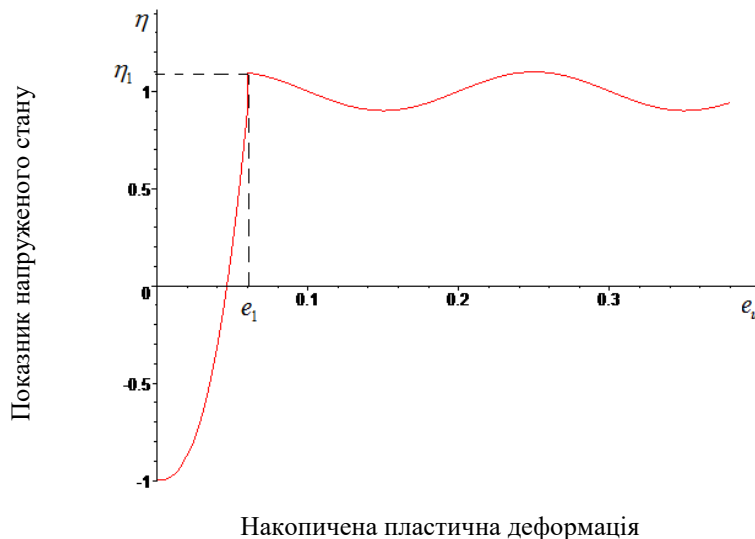


Рис. 1. Схематичний графік функції, що апроксимує шляхи деформування точок бічних поверхонь заготовки під час процесу вальцювання

Із умови неперервності функції (1) в точці $\eta = \eta_1$ випливає співвідношення:

$$a_1 = \frac{\eta_1 - \eta_0}{\bar{e}_1^s},$$

з урахуванням якого математична модель шляхів деформування точок зовнішньої та внутрішньої поверхонь заготовки під час процесу вальцювання на клин матиме вигляд:



$$\eta = \begin{cases} \eta_0 + \left(\frac{\bar{e}_u}{e_1}\right)^s \cdot (\eta_1 - \eta_0), & \bar{e}_i \leq \bar{e}_1 \\ \eta_1 + a \cdot \sin(\pi \cdot \omega \cdot (\bar{e}_u - \bar{e}_1)), & \bar{e}_i > \bar{e}_1 \end{cases} \quad (2)$$

Використаємо критерій В. Огороднікова:

$$\psi(\bar{e}_u) = \int_0^{\bar{e}_u} \left(1 + 0.2 \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{d\eta}{de_u}\right)\right) \cdot \frac{e_u^{0.2 \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{d\eta}{de_u}\right)}}{e_p(\eta)^{1+0.2 \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{d\eta}{de_u}\right)}} de_u < 1, \quad \bar{e}_u < \bar{e}_p, \quad (3)$$

$$\psi(\bar{e}_p) = \int_0^{\bar{e}_p} \left(1 + 0.2 \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{d\eta}{de_u}\right)\right) \cdot \frac{e_u^{0.2 \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{d\eta}{de_u}\right)}}{e_p(\eta)^{1+0.2 \cdot \operatorname{arctg}\left(\frac{d\eta}{de_u}\right)}} de_u = 1, \quad (4)$$

де похідну $\frac{d\eta}{d\bar{e}_u}$ знаходимо диференціюванням (2):

$$\frac{d\eta}{d\bar{e}_u} = \begin{cases} \frac{s}{\bar{e}_1} \cdot \left(\frac{\bar{e}_u}{\bar{e}_1}\right)^{s-1} \cdot (\eta_1 - \eta_0), & \bar{e}_i \leq \bar{e}_1 \\ \pi \cdot a \cdot \omega \cdot \cos(\pi \cdot \omega \cdot (\bar{e}_u - \bar{e}_1)), & \bar{e}_i > \bar{e}_1 \end{cases} \quad (5)$$

Отже, з урахуванням (2), (5) критерій (4) набуває вигляду:

при $\bar{e}_p \leq \bar{e}_1$

$$\psi(\bar{e}_p) = \int_0^{\bar{e}_p} h_1(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u) \cdot \frac{e_u^{h_1(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u)-1}}{e_p \left[\eta_0 + \left(\frac{e_u}{e_1}\right)^s \cdot (\eta_1 - \eta_0) \right]^{h_1(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u)}} \cdot de_u = 1, \quad (6)$$

при $\bar{e}_p > \bar{e}_1$

$$\begin{aligned} \psi(\bar{e}_p) = & \int_0^{\bar{e}_1} h_1(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u) \cdot \frac{e_u^{h_1(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u)-1}}{e_p \left[\eta_0 + \left(\frac{e_u}{e_1}\right)^s \cdot (\eta_1 - \eta_0) \right]^{h_1(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u)}} \cdot de_u + \\ & + \int_{\bar{e}_1}^{\bar{e}_p} h_2(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u) \cdot \frac{e_u^{h_2(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u)-1}}{e_p \left[\eta_0 + \left(\frac{e_u}{e_1}\right)^s \cdot (\eta_1 - \eta_0) \right]^{h_2(s, e_1, \eta_0, \eta_1, e_u)}} \cdot de_u = 1, \end{aligned} \quad (7)$$

де крива граничних деформацій при стаціонарному деформуванні представлена апроксимацією [12]:

$$\bar{e}_p(\eta) = \bar{e}_p(\eta=0) \cdot \exp \left[-\eta \cdot \ln \left(\frac{(1-\eta) \cdot \bar{e}_p(\eta=-1)}{2 \cdot \bar{e}_p(\eta=0)} + \frac{(1+\eta) \cdot \bar{e}_p(\eta=0)}{2 \cdot \bar{e}_p(\eta=1)} \right) \right], \quad (8)$$

через h_1, h_2 позначено функції, що залежать від низки параметрів

$$h_1(s, \bar{e}_1, \eta_0, \eta_1, \bar{e}_u) = 1 + 0.2 \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{s}{\bar{e}_1} \cdot \left(\frac{\bar{e}_u}{\bar{e}_1}\right)^{s-1} \cdot (\eta_1 - \eta_0) \right) \quad (9)$$

$$h_2(s, \bar{e}_1, \eta_0, \eta_1, \bar{e}_u) = 1 + 0.2 \cdot \operatorname{arctg} \left(\pi \cdot a \cdot \omega \cdot \cos(\pi \cdot \omega \cdot (\bar{e}_u - \bar{e}_1)) \right) \quad (10)$$

$e_p(\eta=-1), e_p(\eta=0), e_p(\eta=1)$ – гранична пластична деформація за умови рівномірного стиску, зсуву та розтягу відповідно.



На рис. 2 зображено криву граничних деформацій при стаціонарному деформуванні для сплаву АМГ, шлях деформування та розрахунку граничну деформацію на цій траєкторії.

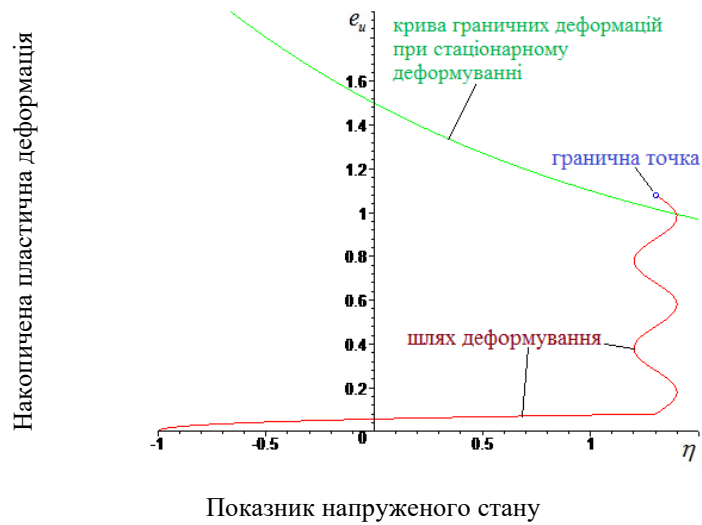


Рис. 2. Розрахункова гранична деформація матеріалу небезпечної зони заготовки під час процесу вальцювання. Розрахунок за (7÷10): $e_p(\eta = -1) = 2,2$; $e_p(\eta = 0) = 1,5$; $e_p(\eta = 1) = 1,1$; $\eta_1 = 1,3$; $e_1 = 0,08$; $s = 0,4$; $a = 0,1$; $\omega = 10$.

На рис. 3 надано аналогічні результати для інших матеріалів.

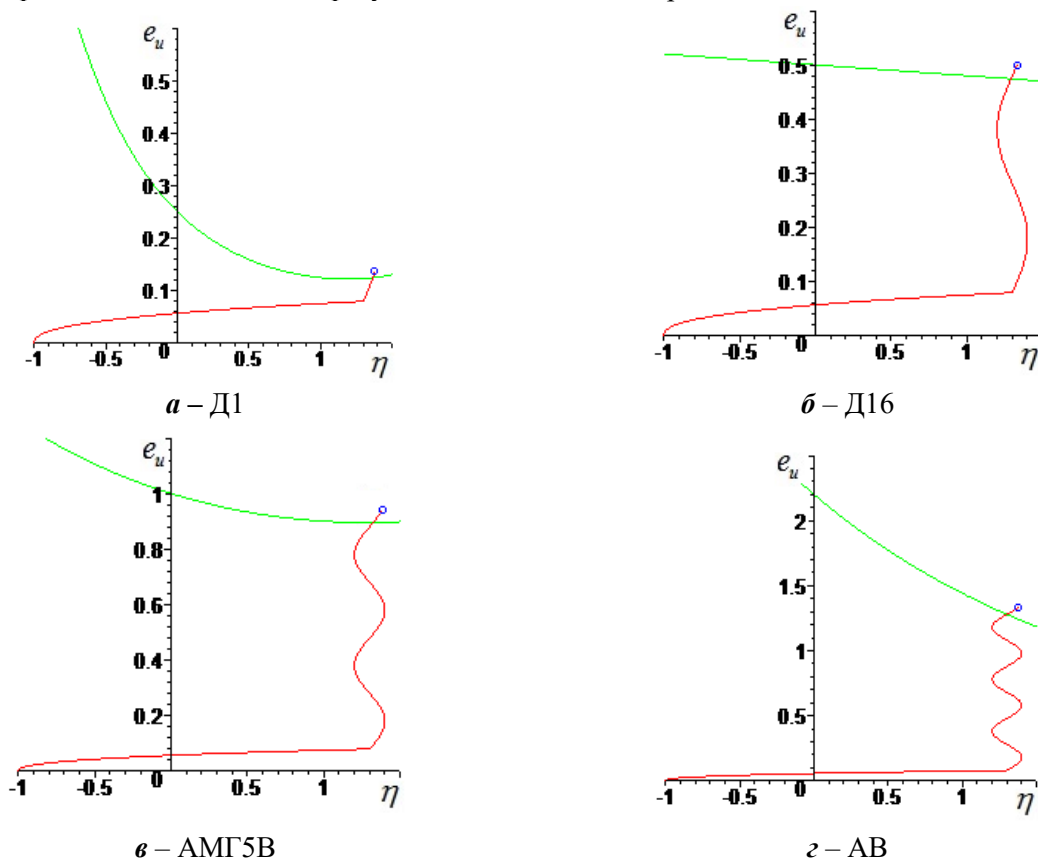


Рис. 3. Розрахункова гранична деформація матеріалу небезпечної зони заготовок із різних матеріалів під час процесу вальцювання

Із представлених результатів випливає, що для різних матеріалів гранична пластична деформація в небезпечній зоні заготовки відрізняється від граничної пластичної деформації за умов розтягу на нехтовно малу величину, що не перевищує похибки розсіювання експериментальних даних.



Слід зазначити, що отриманий висновок зроблено за відсутності традиційного припущення про незалежність від матеріалу заготовки шляху деформування точок небезпечної зони заготовки, або за умов цього припущення в пом'якшеному виді.

Отже, граничну до руйнування деформацію e_* для матеріалу вальцьованої заготовки можна визначити за відомими довідковими значеннями відносного звуження ψ_{ul} , як $e_* = \ln \frac{1}{1 - \psi_{ul}}$.

При побудові технологічних процесів холодного вальцювання заготовок, визначена гранична до руйнування інтенсивність деформацій не є зручною для використання. Тому нами був досліджений зв'язок між інтенсивністю деформацій і ступенем обтиснення заготовок при вальцюванні шляхом моделювання процесу в програмному комплексі DEFORM 3D.

Для побудови залежності між ступенем обтиснення та накопиченою деформацією на вільній бічній поверхні заготовки розроблено відповідні методики. Для уникнення впливу особливої течії матеріалу на кінцях заготовки, які на виробництві вважаються за припуски на дефект заготовки, було проведено дослідження точок на відстані 10 мм від початку заготовки. Точки вибиралися на вільній бічній стороні заготовки та на вершині, яка знаходиться під валком під час вальцювання. Точку на вершині брали для перевірки її переміщення саме в площині, що перпендикулярна до вісі заготовки. Це необхідно для геометричного визначення приросту зменшення висоти заготовки під час вальцювання.

При деформаціях $e_u \geq 0,1$ зв'язок між інтенсивністю деформацій і відносним стисненням має лінійну залежність, показану на рис. 4. описується рівнянням [13]:

$$h_0/D = 0,818 - 0,723 \cdot e_u. \quad (11)$$

Звідки отримуємо граничну на момент руйнування товщину вальцьованої заготовки:

$$h_* = (0,818 - 0,723 \cdot e_*) \cdot D. \quad (12)$$

Це дає можливість визначити граничну товщину заготовки h_* при заданому діаметрі D , яку можна отримати вальцюванням без руйнування.

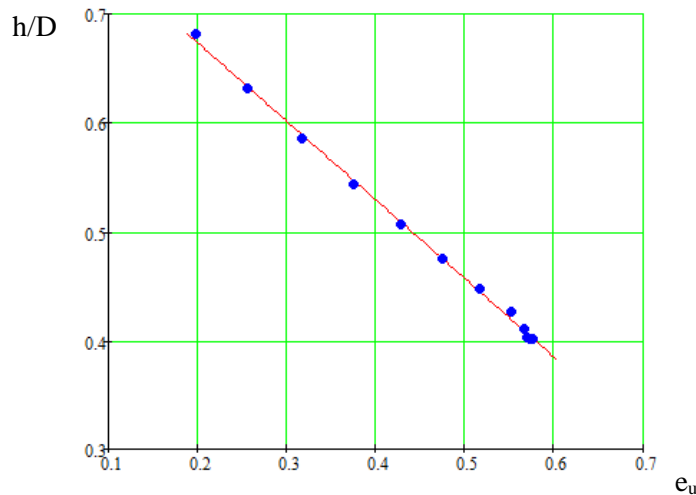
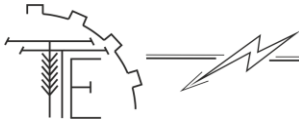


Рис. 4. Залежність між відносним стисненням h/D і інтенсивністю деформацій e_u для точок вільної бічної поверхні заготовки при вальцюванні

При цьому граничну до руйнування деформацію e_* визначають для конкретного матеріалу за відомими кривими граничних деформацій або за результатами випробувань.

5. Висновки

У результаті проведеного дослідження напружено-деформованого стану циліндричних заготовок при вальцюванні встановлено його суттєву неоднорідність в зоні деформування. Найбільш жорсткий напружений стан спостерігається на вільних бічних поверхнях заготовки, що обумовлює небезпеку її руйнування в цій зоні. Під час процесу вальцювання на клин гранична пластична



деформація в небезпечній зоні заготовки із задовільним ступенем точності може вважатися рівною граничній пластичній деформації за умов розтягу.

Отримано залежності між відносним стисненням заготовки при вальцюванні та інтенсивністю деформацій на її бічній поверхні.

У результаті проведеної оцінки деформовності алюмінієвих сплавів при холодному вальцюванні, з використанням кривих граничних деформацій і скалярного критерію деформовності визначено граничні до руйнування значення інтенсивності деформацій та граничну величину відносного стиснення заготовки.

Список використаних джерел

1. Калетнік Г. М. та ін. Основи інженерних методів розрахунків на міцність і жорсткість. Київ, Україна: Хай-Тек Прес, 2013. 616 с.
2. Бейгельзімер Я. Е., Варюхін В. Н., Орлов Д. В., Сынков С. Г. Винтовая экструзия – процесс накопления деформации. Донецк: Фирма ТЕАН, 2003. 87 с
3. Алиев И. С., Абхари П. Б., Еремина А. А.. "Моделирование процесса штамповки в закрытых штампах методом конечно элементов". Пластическая деформация металлов. Научное издание. Днепропетровск. Т1. 2014. 265 с.
4. Огородников В. А., Деревенько И. А., Алиева Л. И. Ресурс пластичности металлов при холодном объемном формоизменении. Монография. 2016. <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/14305/ova%20%281%29.PDF?sequence=1&isAllowed=y>
5. Михалевич В. М.. Тензорні моделі накопичення пошкоджень. Вінниця: «УНІВЕРСУМ Вінниця», 1998. 195 с.
6. Грушко О. В. Карты материалов в холодной обработке давлением. Винница: ВНТУ. 2014.
7. Матвійчук В. А., Алиев И. С. Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов. Монография. Краматорск: ДГМА, 2009.
8. Смирнов В. К. "Методика оценки деформируемости металла на поверхности заготовок лопаток при однопроходной вальцовке по схеме круг-овал". *Авиационная промышленность*. 1982. № 5, С. 18–21,
9. Матвійчук В. А., Михалевич В. М., Добранюк Ю. В., Бубновська І. А. "Спосіб визначення пластичності металів вальцюванням циліндричних зразків на клин", *МПК G01N 3/08 (2006/01)*. № 109984, Верес. 26, 2016.
10. Харламов А. А., Латаев А. П., Галкин В. В., Уланов П. В., «Моделирование обработки металлов давлением с помощью комплекса DEFORM», САПР и графика. 2005. № 5. URL: <https://sapr.ru/article/7366>.
11. Севостьянов І. В., Добранюк Ю. В., Бубновська І. А. Розвиток процесів вальцювання криволінійних заготовок із алюмінієвих сплавів. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2017. № 2 (6), С. 150–157. URL: <https://vmt.vntu.edu.ua/index.php/vmt/issue/view/7>.
12. Михалевич В. М., Алиева Л. И. Аппроксимация кривых предельной деформации сплайн-функциями. *Обработка металлов давлением: сборник научных трудов*, 2010. № 3 (24). с. 3–10,
13. Матвійчук В. А., Бубновська І. А. Розвиток процесів вальцювання криволінійних заготовок із алюмінієвих сплавів. *VII Міжн. Наук.-техн. конф. Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти*, Київ-Херсон, НТУУ «КПІ» ММІ, 2016, С. 26–29.

References

- [1] Kaletnik, G.M. (2013). *Fundamentals of engineering methods of calculations for strength and rigidity*. Kyiv, Ukraine: Hi-Tech Press. [in Ukrainian].
- [2] Beigelzimer, Ya. E., Varyukhin, V. N., Orlov, D. V., Synkov, S. G. (2003). *Screw extrusion is a deformation accumulation process*. Donetsk: Firm TEAN. [in Ukrainian].
- [3] Aliev, I. S., Abhari, P. B., Eremina, A. A.. (2014). "Modeling the process of stamping in closed dies by the finite element method". *Plastic deformation of metals*. Scientific publication. Dnepropetrovsk. T1. [in Ukrainian].
- [4] Ogorodnikov, V. A., Derevenko, I.A, Aliyeva, L.I. (2016). *Resource of plasticity of metals at cold volume deformation*. Monograph. <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/14305/ova%20%281%29.PDF?sequence=1&isAllowed=y> [in Ukrainian].
- [5] Mikhalevich, V.M. (1998). *Tensor models of damage accumulation*. Vinnytsia: UNIVERSUM Vinnytsia. [in Ukrainian].



- [6] Grushko O.V. (2014). Maps of materials in cold processing by pressure. Vinnytsia: VNTU. [in Ukrainian].
- [7] Matviychuk, V.A., Aliev, I.S. (2009). Improving the processes of local rotational pressure treatment based on the analysis of the deformability of metals. Monograph. Kramatorsk: DGMA. [in Ukrainian].
- [8] Smirnov, V.K. (1982). [et al.]. "Methods for assessing the deformability of metal on the surface of the workpieces of the blades during a single-pass rolling according to the circle-oval scheme." Aviation industry, 5, 18–21. [in Russian].
- [9] Matviychuk, V.A., Mikhalevich, V.M., Dobranyuk, Yu. V., Bubnovska, I.A. (2006). "Method for determining the ductility of metals by rolling cylindrical specimens on a wedge", IPC G01N 3/08 (2006/01). № 109984, Sep.26. [in Ukrainian].
- [10] Kharlamov, A. A., Lataev, A.P., Galkin, V.V., Ulanov, P.V. (2005). Modeling of metal processing by pressure using the DEFORM complex, CAD and graphics, 5. Available: <https://sapr.ru/article/7366>. [in Russian].
- [11] Sevostyanov, I.V., Dobranyuk, Yu. V., Bubnovska, I.A. (2017). Development of rolling processes of curved billets made of aluminum alloys. *Bulletin of Mechanical Engineering and Transport, VNTU*, 2(6), 150–157. Regime access: <https://vmt.vntu.edu.ua/index.php/vmt/issue/view/7>. [in Ukrainian].
- [12] Mikhalevich, V.M., Aliyeva, L.I. (2010). Approximation of marginal deformation curves spline functions. *Metal processing by pressure: a collection of scientific papers*, 3 (24), 3–10. [in Ukrainian].
- [13] Matviychuk, V.A., Bubnovskaya, I.A. (2016). "Development of rolling processes of curvilinear blanks from aluminum alloys "on VII International Scientific and technical conf. Theoretical and practical problems in the processing of materials by pressure and quality of professional education, Kyiv-Kherson, NTUU "KPI" MMI, 26–29. [in Ukrainian].

ОЦЕНКА ДЕФОРМИРУЕМОСТИ МАТЕРИАЛА ЗАГОТОВОК ПРИ ВАЛЬЦОВКЕ

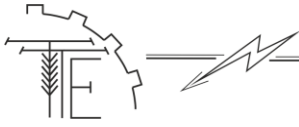
В статье приведены результаты разработки и исследования технологического процесса холодной формовочной вальцовки алюминиевых заготовок. Основным препятствием для внедрения таких процессов является опасность разрушения материала, что обусловило необходимость исследования напряженно-деформированного состояния пластичности и оценки деформируемости материала заготовок. Для экспериментального определения пластичности металлов был разработан способ вальцовки, при котором деформирование свободной боковой поверхности цилиндрического образца происходит в условиях одноосного растяжения. Увеличение степени деформации и доведение материала до разрушения обеспечивается ростом радиусов валков по ходу вальцовки и деформированием образца на клин. Анализ напряженно-деформированного состояния свободной поверхности цилиндрической заготовки проводили методом конечных элементов, с использованием специализированного инженерного программного комплекса DEFORM 3D. В результате установлено существенную неоднородность напряженно-деформированного состояния в зоне деформирования. Наиболее жесткое напряженное состояние наблюдается на свободных боковых поверхностях заготовки, что может привести к ее разрушению в этой зоне. Получена зависимость между относительным сжатием заготовки и интенсивностью деформаций на ее боковой поверхности при вальцовке, что дает возможность определять предельные к разрушению значения толщины заготовки. В результате проведенной оценки деформируемости алюминиевых сплавов при холодной вальцовке, с использованием кривых предельных деформаций и скалярного критерия деформируемости, определены: предельная к разрушению интенсивность деформаций и предельное значение относительного сжатия заготовки. С использованием построенных моделей можно определять величину использованного ресурса пластичности на промежуточных стадиях вальцовки.

Ключевые слова: холодная формовочная вальцовка, напряженно-деформированное состояние, пластичность, оценка деформируемости материала, вальцовка на клин, интенсивность деформаций, относительное сжатие.

Ф. 12. Рис. 4. Лит. 13.

EVALUATION OF DEFORMABILITY OF MATERIAL OF PREPARATIONS DURING ROLLING

The article presents the results of development and research of the technological process of cold forming rolling of aluminum billets. The main obstacle to the implementation of such processes is the danger of destruction of materials, which necessitated the study of the stress-strain state, plasticity and assessment of



the deformability of the workpiece material. To experimentally determine the ductility of metals, a rolling method was developed, according to which the deformation of the free side surface of the cylindrical sample occurs under uniaxial tension. Increasing the degree of deformation and bringing the material to fracture is provided due to the increase in the radii of the rolls during rolling and deformation of the sample on the wedge. Analysis of the stress-strain state of the free side surface of the cylindrical workpiece was performed by the finite element method, which used a specialized engineering software package DEFORM 3D. As a result, a significant inhomogeneity of the stress-strain state in the deformation zone is established. The most severe stress state is observed on the free side surfaces of the workpiece, which causes the danger of its destruction in this area. The dependence between the relative compression of the workpiece during rolling and the intensity of deformation on its side surface is obtained, which allows to determine the limiting thickness of the workpiece before destruction. As a result of the assessment of the deformability of aluminum alloys during cold rolling, using the curves of limit deformations and the scalar criterion of deformation, the limits to the destruction of the intensity of deformation and the limit value of the relative compression of the workpiece. The use of constructed models makes it possible to determine the value of the used plasticity resource at intermediate stages of rolling.

Key words: cold forming rolling, stress-strain state, plasticity, estimation of deformability of material, rolling on a wedge, intensity of deformations, relative compression.

F. 12. Fig. 4. Ref. 13.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Михалевич Володимир Маркусович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри вищої математики Вінницького національного технічного університету (вул. Хмельницьке шосе 95, м. Вінниця, Україна, 21021, e-mail: mykhalevych@vntu.edu.ua,).

Матвійчук Віктор Андрійович – доктор технічних наук, професор, декан інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: vamatv50@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7837-5174>).

Бубновська Ірина Анатоліївна – асистент Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: biana25100@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3535-3127>).

Михалевич Владимир Маркусович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики Винницкого национального технического университета (ул. Хмельницкое шоссе 95, г. Винница, Украина, 21021, e-mail: mykhalevych@vntu.edu.ua,).

Матвийчук Виктор Андреевич – доктор технических наук, профессор, декан инженерно-технологического факультета Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина, 21008, e-mail: vamatv50@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7837-5174>).

Бубновская Ирина Анатольевна – ассистент Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, Украина, 21008, e-mail: biana25100@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3535-3127>).

Mikhalevich Volodymyr – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Higher Mathematics of the Vinnytsia National Technical University (95 Khmelnytske Shosse St., Vinnytsia, Ukraine, 21021, e-mail: mykhalevych@vntu.edu.ua,).

Matviychuk Viktor – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Electric Power Stations and Systems of the Vinnytsia National Agrarian University (3 Solnechna St., Vinnitsa, 21008, Ukraine, email: vamatv50@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7837-5174>).

Bubnovska Iryna – Assistant of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna Street, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: biana25100@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3535-3127>).