

УДК 621.771.011

Тарасов О. Ф.
Алтухов О. В.
Грибков Е. П.
Салалайко О. І.

СКІНЧЕНО-ЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРОКАТКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНТЕНСИВНОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ЗАГОТОВОК

Процеси інтенсивного пластичного деформування (ІПД), в яких вдається значно поліпшити фізико-механічні характеристики матеріалу заготовки, в наступний час активно застосовуються для дослідницького та промислового використання [1]. Однак практично відсутнє спеціалізоване та оптимізоване для проектування технологічних процесів програмне забезпечення, яке враховує особливості реалізації багатоетапних процесів обробки тиском і різні маршрути деформування заготовки [2].

Для моделювання процесів ІПД добре себе зарекомендували САЕ-системи різного рівня, які підтримують необхідні реологічні моделі поведінки матеріалу в процесі обробки [3]. Одним із шляхів створення спеціалізованого програмного забезпечення для проектування процесів ІПД є розробка інтегрованих САПР на базі промислових САЕ-систем, які підтримують відкриті інтерфейси для взаємодії із зовнішніми програмами [4]. До числа таких САЕ-систем відноситься DS ABAQUS, яка включає підтримку мови Python для взаємодії з препроцесором на етапі підготовки моделі та пост-процесором на етапі отримання результатів моделювання [5].

Авторами ведеться робота зі створення інтегрованої САПР процесів ІПД об'ємних заготовок [6], яка включає модулі для моделювання окремих або комбінованих процесів ІПД в середовищі САЕ-системи DS ABAQUS [7]. ІСАПР для процесів ІПД, що розробляється для вибору режимів процесу та проектування штампного оснащення, орієнтована на рядового конструктора, що не має багаторічного досвіду роботи з САЕ-системами високого рівня, і тим більше досвіду програмування в таких системах. Розширення можливостей ІСАПР процесів ІПД для моделювання операцій прокатки дозволить застосовувати її для більш широкого спектра заготовок і технологічного обладнання, а також розширити номенклатуру продукції.

Використання методу скінчених елементів (МСЕ) для моделювання процесу прокатки дозволяє розширити сортамент продукції з субмікросталічною структурою за рахунок підвищення ефективності процесу вибору параметрів та інтенсифікації пластичної деформації, а також виконати дослідження нових комбінованих методів деформування. Крім того, комбіноване використання ІПД та процесу прокатки додатково підвищує фізико-механічні характеристики матеріалу заготовки та суттєво збільшує продуктивність і знижує собівартість продукції [8].

Одним з прогресивних видів ІПД є деформація скручуванням [9]. Спосіб обробки матеріалів методом гвинтової екструзії дозволяє накопичувати в заготовках великі деформації за ряд операцій [10]. Цей метод може бути застосований до обробки та виготовлення заготовок з матеріалів, що мають відносно низький ресурс пластичності завдяки можливості забезпечувати протитиск. Слід відмітити, що для промислового впровадження необхідно підвищувати продуктивність методів ІПД, в тому числі з використанням інструменту, що обертається [11].

Стосовно деформування довгомірних заготовок з використанням скручування відомий спосіб деформації металевої заготовки некруглого перерізу шляхом прокатки скрізь калібри, які мають форму перерізу заготовки. Ділянку заготовки, розташовану між клітями, попередньо закручують, що забезпечує деформування заготовки скручуванням по всій

довжині [12]. Недоліками цього способу є інтенсивне зношування інструменту, а також напруження розтягування заготовки в процесі деформування, яке можна регулювати тільки відстанню між інструментами та кутом повороту між ними, що знижує можливості деформування матеріалів, які мають низький ресурс пластичності. Крім того, для попереднього закручування заготовки потрібне додаткове обладнання.

Цих недоліків позбавлений запропонований авторами спосіб, що передбачає використання як робочого інструменту прокатних валків, що дає можливість додатково до скручування деформувати переріз заготовки та отримати більш пророблену структуру виробу [13]. Застосування обтиснень у валках з гладкою бочкою, а також різної швидкості прокатних валків дозволяє забезпечити напруження стиснення заготовки між парами валків і підвищити пластичність матеріалу заготовки. Використання різного куту нахилу трикутних рівчаків на другій парі валків дозволяє регулювати розподіл деформацій по перерізу заготовки в процесі деформування крученням. Прокатка також підвищує швидкість і продуктивність процесу деформування, а також знижує зношування поверхні інструменту. Однак на даний час відсутнє уявлення про кількісний вплив параметрів цього процесу на рівень деформацій, а також їх перерозподіл по перерізу заготовки, що знижує його ефективність і робить доцільним подальше дослідження.

Метою даної роботи є визначення кількісного і якісного впливу технологічних параметрів на перерозподіл деформацій по перерізу заготовки в процесі прокатки з реалізацією схеми інтенсивного пластичного деформування металевої заготовки скручуванням на основі моделювання з використанням МСЕ.

Відповідно до способу прокатки крученням [13] заготовка подається та утримується з обтисненням прокатними валками з гладкою бочкою з подальшим деформуванням прокатними валками з каліброваною поверхнею рівчаків у вигляді трикутників, що нахилені до твірної на кут кручення заготовки (рис. 1, а). Таким чином, прокатні валки з гладкою бочкою 1 подають заготовку 2 з обтисненням в прокатні валки 3. Трикутні рівчаки валків 3 створюють крутний момент, який повертає заготовку навколо поздовжньої осі. Кут кручення заготовки визначається з умови захвату металу валками, а відстань між парами валків – припустимим кутом скручування заготовки, що залежить від механічних властивостей матеріалу, який деформується. Таким чином виключається необхідність попереднього закручування заготовки перед прокаткою.

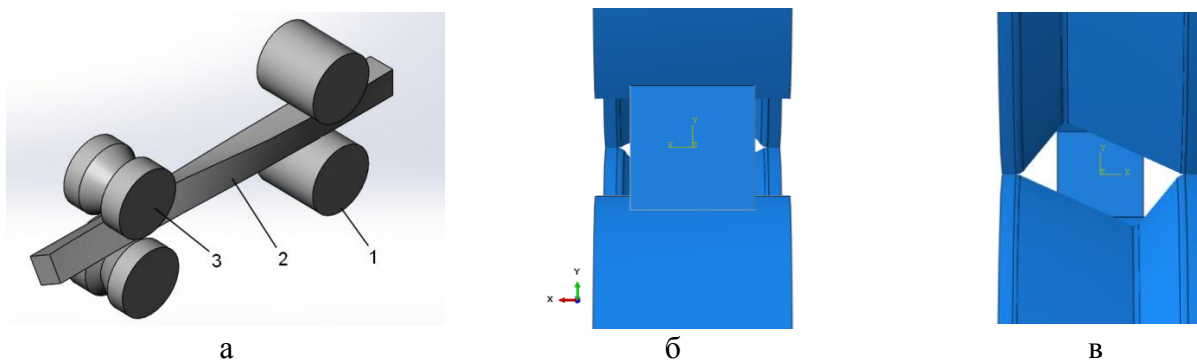


Рис. 1. Технологічна (а) та розрахункова (б, в) схеми деформування металевої заготовки некруглого перерізу прокаткою з крученням (1 – заготовка; 2 – валки з гладкою бочкою; 3 – валки з каліброваною бочкою, рівчаки у вигляді трикутників):

а – загальний вигляд; б – вигляд з вхідної сторони; в – вигляд з вихідної сторони кліти

Моделювання процесу прокатки заготовки некруглого перетину зі скручуванням вимагає постановку задачі у тривимірному просторі. Найбільш раціональним в цьому випадку для дослідження НДС є застосування методу скінчених елементів. Так як цей процес є нетиповим, то доцільно використовувати більш універсальну САЕ-систему DS ABAQUS.

При моделюванні використовувалася розрахункова схема (рис. 1, б, в). Переріз заготовки був квадратним (рис. 1, б), а калібр другої пари валків – у вигляді паралелограма, що був створений трикутними рівчаками на валках (рис. 1, в).

Для заготовки і валків здійснювали дискретизацію об'єму (побудову скінчено-елементної сітки). При цьому, для моделювання валків були використані жорсткі тривимірні елементи, а для заготовки використовували восьмивузлові лінійні, твердотільні редуковані елементи з контролем руйнування C3D8R [5].

При моделюванні процесу прокатки були використані наступні граничні умови: валки мали одну обертальну ступінь свободи і кутову швидкість обертання для валків з циліндричною бочкою 3 рад/с, а з каліброваною – 1,5 рад/с. Контакт між заготовкою та валками задавався за допомогою моделі контакту «Поверхня до поверхні» з коефіцієнтом тертя 0,2. Для матеріалу заготовки були задані: щільність, пружні властивості та пластичність, а саме крива течії [14]. Задачу було вирішено в динамічній постановці, що дозволяє моделювати процес захвату металу валками і дає можливість використовувати кут захвату як критерій оптимізації для пошуку параметрів процесу, що забезпечують його стабільність.

Для оцінки отриманих результатів вихідними параметрами були обрані проекції реакцій в контрольних точках валків (reference point) в глобальній системі координат, а також деформації і напруження у вузлах скінчених елементів заготовки.

В якості прикладу виконання способу деформування металевої заготовки некруглого перерізу було досліджено прокатку алюмінієвої заготовки некруглого перерізу було досліджено прокатку алюмінієвої заготовки. Відповідно до технології заготовки перерізом 10×10 мм задавали в прокатні валки з гладкою бочкою діаметром 100 мм на швидкості 100 мм/с з обтисненням 10 %, тобто із міжвалковим зазором 9 мм. Далі заготовку подавали у прокатні валки з каліброваною бочкою радіусом 100 мм, що були розташовані на відстані від 95 до 165 мм від валків з гладкою бочкою. Зменшення відстані до 95 мм можна досягти поверненням вісей валків з гладкою бочкою або використанням проводки. Рівчак на валках уявляв собою трикутник з кутом вершини 105° , нахилений до твірної бочки на $15 \dots 30^\circ$ (рис. 2, а).

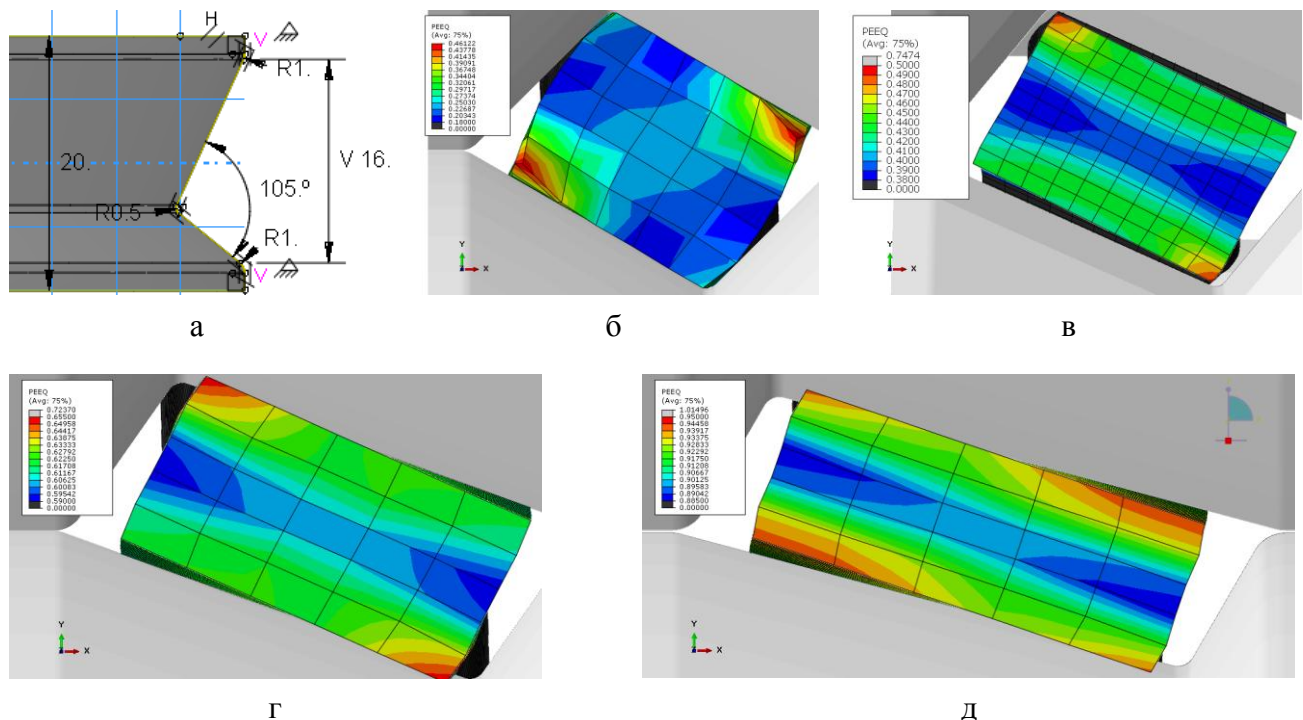


Рис. 2. Розміри рівчака калібру (а) та розподіл еквівалентної пластичної деформації по перерізу заготовки для різних кутів нахилу рівчака:

б – 30° ; в – 25° ; г – 20° ; д – 15°

Відстань між клітями визначається наявністю пластичної деформації заготовки та максимальним кутом захвату металу валками. Кут нахилу рівчака регламентується кутом захвату металу валками, він безпосередньо впливає на величину скручування заготовки, тому максимальне значення цього кута також регламентується пластичністю металу заготовки.

Одним з найбільш важливих показників технологічних можливостей процесів інтенсивної пластичної деформації є рівномірність розподілу накопиченої деформації по перетину і довжині заготовки, так як вона впливає на об'єм відходів після обробки. Для оцінки розподілу накопиченої деформації по перерізу заготовки був використаний коефіцієнт нерівномірності деформацій (1) [2]. Для випадку з трьома областями деформації та наявністю осередку деформації, оцінку розподілу деформації по перерізу заготовки виконували наступним чином:

$$K_e = \frac{1}{2} \left(\left| \frac{e_{\max} - \langle e_i \rangle}{e_{\max}} \right| + \left| \frac{e_{\max} - \langle e_i \rangle}{\langle e_i \rangle} \right| \right); \quad (1)$$

$$\langle e_i \rangle = \frac{e_{i1} S_1 + e_{i2} S_2 + e_{i3} S_3}{S_1 + S_2 + S_3}, \quad (2)$$

де e_{\max} – максимальне значення деформації по перерізу заготовки;

$\langle e_i \rangle$ – середнє значення деформації по перерізу заготовки;

e_{i1}, e_{i2}, e_{i3} – середні значення деформації для трьох зон заготовки, з мінімальними, середніми і максимальними значеннями;

S_1, S_2, S_3 – площі кожної з трьох зон деформації відповідно, мм².

Основні параметри, що дозволяють керувати процесом:

- відстань між клітями;
- кут нахилу рівчака;
- геометричні розміри калібру;
- обтиснення в першій кліті;
- різниця в лінійних швидкостях валків першої та другої кліті.

Для аналізу впливу форми калібру був виконаний ряд розрахунків для різних кутів нахилу рівчака другої кліті від 30° до 15°. Розподіл еквівалентних пластичних деформацій представлений на рис. 2, б-д, а коефіцієнт розподілу деформацій – на рис. 3.

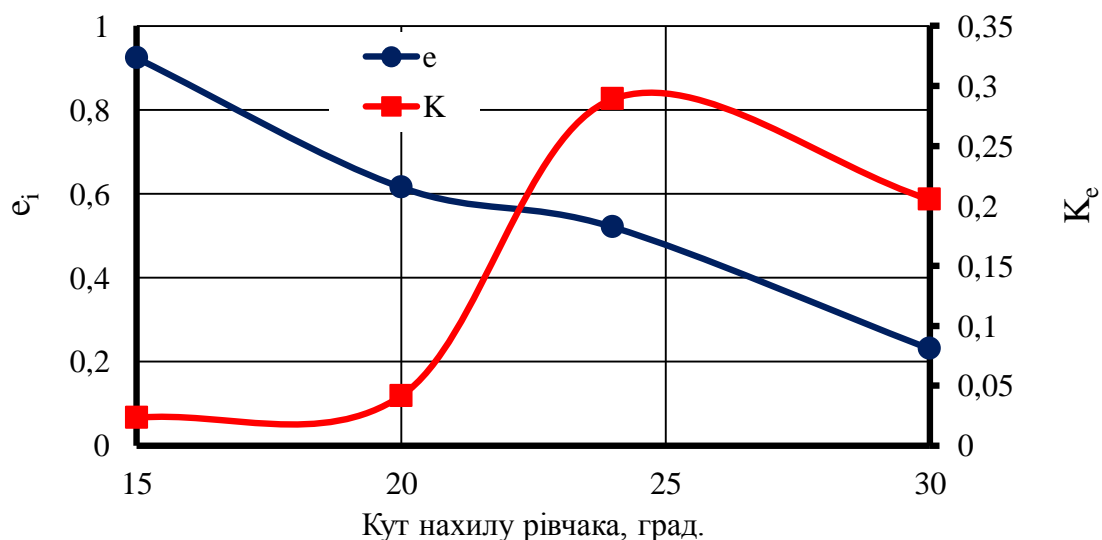


Рис. 3. Залежність коефіцієнту розподілу деформацій від кута нахилу рівчака

Геометричні розміри калібру, а саме розміри діагоналей та кути вершин, впливають на перерозподіл пластичної деформації по перерізу заготовки. При одночасному збільшенні сумарної деформації та різниці між кутами калібру у вигляді паралелограму розподіл деформації буде більш неоднорідний. Різниця в швидкостях валків першої та другої кліти буде впливати на перерозподіл повздовжньої та поперечної деформації заготовки в калібрі. Мінімальне значення швидкості обертання валків другої кліти буде визначатися випередженням металу при обтисненні в першій кліті, а максимальне – межею міцності матеріалу на розтягування (між парами валків). З аналізу отриманих залежностей можна зробити висновок, що найбільш раціональним є кут нахилу рівчака від 15 до 20° при розрахунковій відстані між клітями 165 мм. Менший кут нахилу призводить до порушення умови захвату металу валками, більший – до зниження ефективності процесу.

Аналогічні дослідження були зроблені для різних відстаней між клітями. Результати розподілу еквівалентних пластичних деформацій у перерізі заготовки для різних відстаней між клітями представлені на рис. 4, а коефіцієнт розподілу деформацій – на рис. 5. Слід відзначити, що при відстані менш 140 мм перша пара валків була замінена аналогічною роликковою проводкою. З графіків можна зробити висновок, що у даному випадку найбільш раціональною є відстань між клітями 115–125 мм при куту 25°. Збільшення або зменшення цієї відстані призводить до зменшення ефективності процесу.

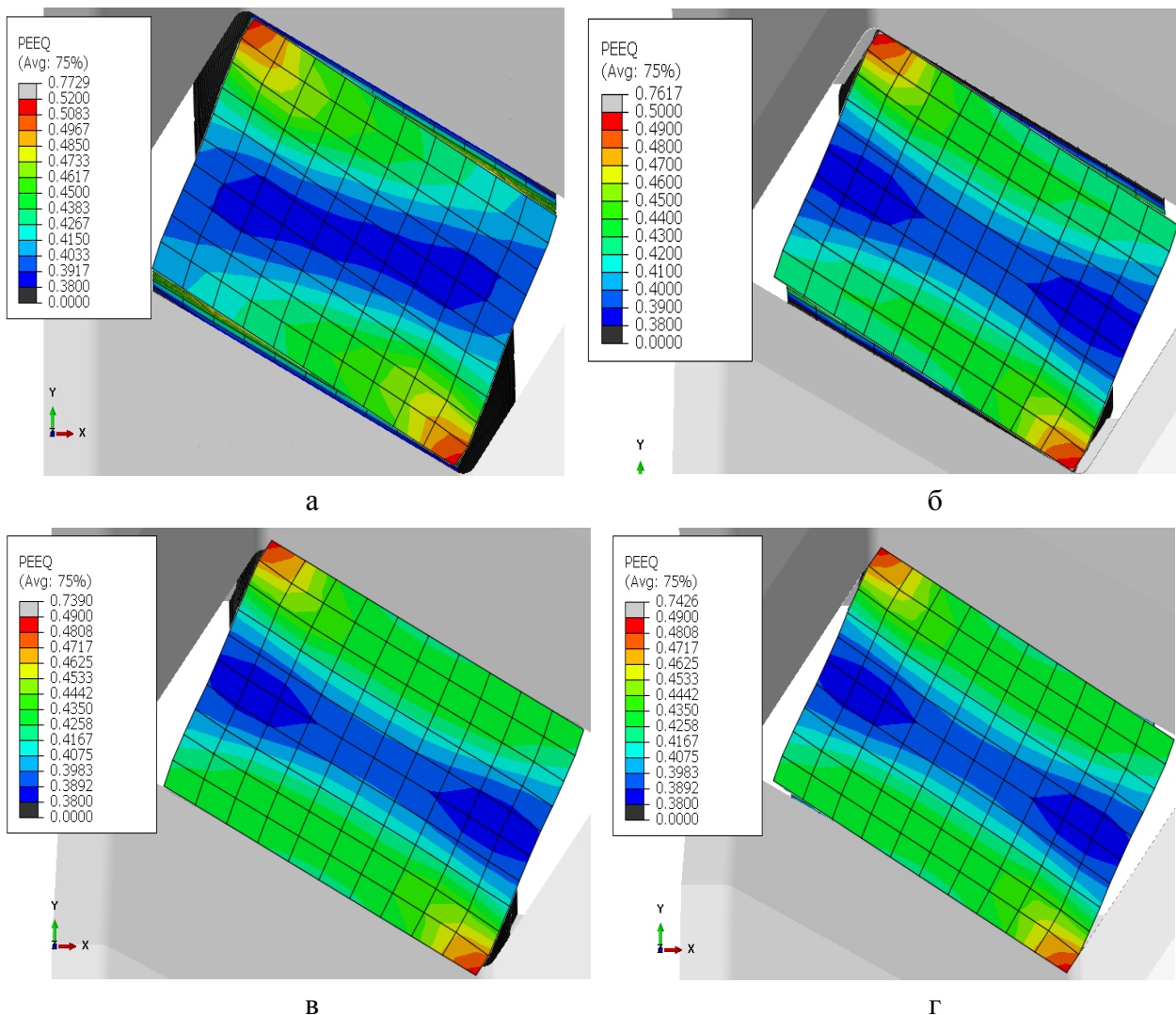


Рис. 4. Розподіл еквівалентної пластичної деформації по перерізу заготовки для різних відстаней між клітями:

а – 95 мм; б – 110 мм; в – 125 мм; г – 140 мм; д – 150 мм; е – 165 мм

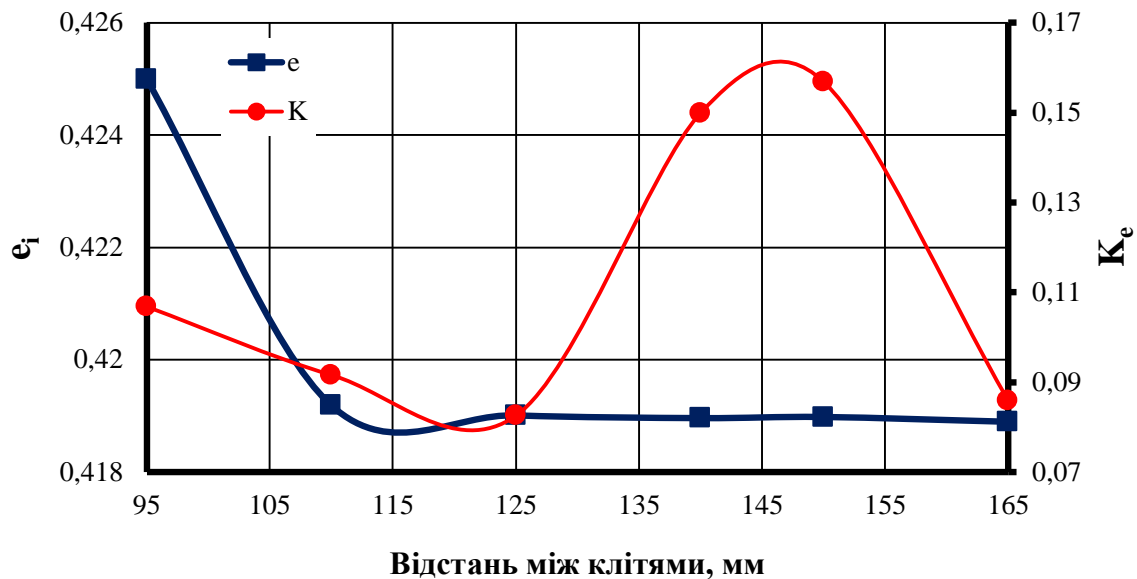


Рис. 5. Залежність коефіцієнту розподілу деформацій від відстані між клітьми

ВИСНОВКИ

На основі моделювання з використанням МСЕ та дослідження процесу інтенсивної пластичної деформації при прокатці з одночасним скручуванням заготовки встановлено основні технологічні параметри процесу: кут нахилу рівчака калібру і відстань між клітьми, а також їх вплив на його стабільність.

На основі аналізу коефіцієнту розподілу еквівалентної пластичної деформації по перерізу заготовки після прокатки шляхом обробки значень деформації в вузлових точках скінчено-елементної сітки встановлено, що для досліджених умов прокатки найбільш раціональним кутом нахилу рівчака калібру є $15 \dots 20^\circ$, а відстань між клітьми – $115 \dots 125$ мм.

Реалізація розглянутої моделі прокатки у САЕ-системі АВАQUS дозволяє додати її як модуль до інтегрованої САПР процесів ПД, що значно розширить сортамент продукції з субмікрокристалічною структурою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Bulk Nanostructured Materials with Multifunctional Properties* / I. Sabirov, N. A. Enikeev, M. Yu. Murashkin, R. Z. Valiev // Springer. – 2015. – 126 p.
2. Періг О. В. Систематизація процесів інтенсивного пластичного деформування (ПД) об'ємних заготовок на основі онтологічного підходу / О. В. Періг, О. Ф. Тарасов, О. В. Алтухов // Вестник НТУ «ХПІ». Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков : НТУ «ХПІ», 2012. – № 46. – С. 83–89.
3. Kuang-Hua Chang. *e-Design: Computer-Aided Engineering Design* / Academic Press. – 2015. – 1204 p.
4. Puri, Gautam. *Python Scripts for ABAQUS: learn by example*. – Charleston, 2011. – 747 p.
5. Khennane Amar. *Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB® and Abaqus*. CRC Press, 2013. – 486 p.
6. Разработка ИСАПР с применением методов инженерии знаний. Решение практических задач : монография / А. Ф. Тарасов, М. А. Винников, С. А. Короткий, О. А. Лябик. – Краматорск : ДГМА, 2012. – 216 с. – ISBN 978-966-379-595-9
7. Автоматизоване проектування і виготовлення виробів із застосуванням САД/САМ/САЕ-систем: монографія / О. Ф. Тарасов, О. В. Алтухов, П. І. Сагайда, Л. В. Васильєва, В. Л. Аносов. – Краматорськ : ЦТPI «Друкарський дім», 2017. – 239 с.
8. Refinement of Microstructure and Mechanical Properties of Titanium Processed by Twist Extrusion and Subsequent Rolling / V. V. Stolyarov, Ya. E. Beigel'zimer, D. V. Orlov, and R. Z. Valiev. // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2005. – Vol. 99, No. 2. – P. 204–211.
9. Faraji G. Accumulative Torsion Back (ATB) Processing as a New Plastic Deformation Technique / G. Faraji, H. Jafarzadeh // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2012. – Vol. 27 (5). – P. 507–511.
10. Twist Extrusion as a Potent Tool for Obtaining Advanced Engineering Materials: A Review / Y. Beygelzimer, R. Kulagin, Y. Estrin, L. S. Toth, H. S. Kim, M. I. Latypov // *Advanced Engineering Materials*. – 2017. – 19: 1600873. – doi:10.1002/adem.201600873.

11. Principles of ECAP–Conform as a continuous process for achieving grain refinement: Application to an aluminum alloy / Cheng Xu et al. // *Acta Materialia*. – 2010. – Vol. 58 (4). –P. 1379–1386.
12. Пат. CN102179402(A), КНР, МПК B21B1/08; B21B39/20. Twisting method utilizing online idle rolling mill to twist oval rolled piece / Wenxue Ye, Wenfeng Yao [CN] ; заявитель и патентообладатель HANXI TAIGANG STAINLESS STEEL CO.,LTD [CN]. – № 2011176130 ; заявл. 29.03.2011 ; опубл. 14.09.2011.
13. Пат. № 122253, Україна, МПК C22F 1/00. Спосіб деформування металевої заготовки некруглого перетину / Тарасов О. Ф., Грибков Е. П., Алтухов О. В., Добряк С. К. ; заявник та патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № у 201707822 ; заявл. 25.07.2017 ; опубл. 26.12.2017, Бюл. № 24.
14. Федоринов В. А. Математическое моделирование напряжений, деформаций и основных показателей качества при прокатке относительно широких листов и полос: монография / В. А. Федоринов, А. В. Сатонин, Э. П. Грибков. – Краматорск, ДГМА, 2010. – 244 с.

REFERENCES

1. Bulk Nanostructured Materials with Multifunctional Properties / I. Sabirov, N. A. Enikeev, M. Yu. Murashkin, R. Z. Valiev // Springer. – 2015. – 126 p.
2. Perig O. V. Sistematizacija procesiv intenzivnogo plastichnogo deformuvannja (IPD) ob'emnih zagotivok na osnovi ontologichnogo pidhodu / O. V. Perig, O. F. Tarasov, O. V. Altuhov // *Vestnik NTU «HPI»*. Se-rija: Novye reshenija v sovremennyh tehnologijah. – Har'kov : NTU «HPI», 2012. – № 46. – S. 83–89.
3. Kuang-Hua Chang. e-Design: Computer-Aided Engineering Design / Academic Press. – 2015. – 1204 p.
4. Puri, Gautam. Python Scripts for ABAQUS: learn by example. – Charleston, 2011. – 747 p.
5. Khemane Amar. Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB® and Abaqus. CRC Press, 2013. – 486 p.
6. Razrobotka ISAPR s primeneniem metodov inzhenerii znaniy. Reshenie prakticheskikh zadach : monografija / A. F. Tarasov, M. A. Vinnikov, S. A. Korotkij, O. A. Ljabik. – Kramatorsk : DGMA, 2012. – 216 s. – ISBN 978-966-379-595-9
7. Avtomatizovane proektuvannja i vigotovlennja virobiv iz zastosuvannjam CAD/CAM/CAE-sistem: monografija / O. F. Tarasov, O. V. Altuhov, P. I. Sagajda, L. V. Vasil'eva, V. L. Anosov. – Kramatorsk : CTRI «Drukars'kij dim», 2017. – 239 s.
8. Refinement of Microstructure and Mechanical Properties of Titanium Processed by Twist Extrusion and Subsequent Rolling / V. V. Stolyarov, Ya. E. Beigel'zimer, D. V. Orlov, and R. Z. Valiev. // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2005. – Vol. 99, No. 2. –R. 204–211.
9. Faraji G. Accumulative Torsion Back (ATB) Processing as a New Plastic Deformation Technique / G. Faraji, H. Jafarzadeh // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2012. – Vol. 27 (5). – R. 507–511.
10. Twist Extrusion as a Potent Tool for Obtaining Advanced Engineering Materials: A Review / Y. Beygelzimer, R. Kulagin, Y. Estrin, L. S. Toth, H. S. Kim, M. I. Latypov // *Advanced Engineering Materials*. – 2017. – 19 : 1600873. – doi:10.1002/adem.201600873.
11. Principles of ECAP–Conform as a continuous process for achieving grain refinement: Application to an aluminum alloy / Cheng Xu et al. // *Acta Materialia*. – 2010. – Vol. 58 (4). –R. 1379–1386.
12. Pat. CN102179402(A), КНР, МПК B21B1/08; B21B39/20. Twisting method utilizing online idle rolling mill to twist oval rolled piece / Wenxue Ye, Wenfeng Yao [CN] ; заявитель и патентообладатель HANXI TAIGANG STAINLESS STEEL CO.,LTD [CN]. – № 2011176130 ; заявл. 29.03.2011 ; опубл. 14.09.2011.
13. Пат. № 122253, Україна, МПК C22F 1/00. Спосіб деформування металевої заготовки некруглого перетину / Тарасов О. Ф., Грибков Е. П., Алтухов О. В., Добряк С. К. ; заявник та патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № у 201707822 ; заявл. 25.07.2017 ; опубл. 26.12.2017, Бюл. № 24.
14. Федорин В. А. Математическое моделирование напряжений, деформаций и основных показателей качества при прокатке относительно широких листов и полос: монография / В. А. Федорин, А. В. Сатонин, Э. П. Грибков. – Краматорск, ДГМА, 2010. – 244 с.

Тарасов О. Ф. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. КІТ ДДМА;

Алтухов О. В. – канд. техн. наук, доц. каф. КІТ ДДМА;

Грибков Е. П. – д-р техн. наук, доц. каф. АММ ДДМА; .

Салалайко О. І. – студент гр. КН-17-1м ДДМА.

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ.

E-mail: kit@dgma.donetsk.ua

Стаття надійшла до редакції 11.03.2018 р.