

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-365-87>

УДК 621.7.043

БАРАНОВ ВЛАДИСЛАВ

Вінницький національний технологічний університет

<https://orcid.org/0009-0009-2425-9248>

e-mail: <mailto:1tt.17b.baranov@gmail.com>

СУХОРУКОВ СЕРГІЙ

Вінницький національний технологічний університет

<https://orcid.org/0000-0003-4201-1691>

e-mail: <mailto:suhorukov@vntu.edu.ua>

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ПОШАРОВОГО ЛОКАЛЬНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ЛИСТОВИХ ЗАГОТОВОК

В роботі наведено результати аналізу сучасного стану досліджень процесу пошарового локального деформування листових заготовок. Розглянуто особливості різних схем формоутворення, зокрема односточкового, двоточкового та двостороннього деформування. Проаналізовано вплив основних параметрів процесу на напружено-деформований стан в зоні деформування, геометричну точність і якість поверхні отриманих заготовок. Визначено, що найбільш перспективними напрямками досліджень є прогнозування накопичення пошкоджень та оцінка використаного ресурсу пластичності матеріалу заготовки.

Ключові слова: пошарове локальне деформування, напружено-деформований стан, використаний ресурс пластичності

BARANOV VLADYSLAV, SUKHORUKOV SERHII

Vinnitsia National Technical University

ANALYSIS OF THE CURRENT STATE OF RESEARCH ON THE PROCESS OF INCREMENTAL SHEET FORMING

The paper presents a generalized analysis of the current state of research on the process of incremental sheet forming, which is considered a promising method for manufacturing thin-walled parts under conditions of single and small-batch production. The relevance of this study is determined by the need to increase the flexibility of mechanical engineering production, reduce the cost of manufacturing specialized stamping tooling, and ensure high product quality when producing small batches of parts with complex geometries.

The article examines the main types of incremental sheet forming and analyzes their structural and technological features, advantages, and limitations of application. Considerable attention is devoted to the study of the influence of the main technological parameters of the process, including the tool path trajectory, feed rate, tool rotational speed, forming step size, radius of the tool contact surface, and lubrication conditions. The results of experimental and numerical studies aimed at evaluating their influence on the stress-strain state of the material, geometric accuracy, surface roughness, and force characteristics of the forming process are summarized.

Special attention is paid to the influence of technological equipment characteristics on the stability of the forming process and the positioning accuracy of the working tool. The features of the formation of a complex three-dimensional stress-strain state in the contact zone between the tool and the sheet blank are highlighted, and the mechanisms of damage accumulation in the material during sequential local loading are considered.

Based on the analysis performed, the main directions for further research are identified, including the improvement of methods for predicting limiting deformations and material fracture, consideration of technological heredity in the forming process, and the development of recommendations for optimizing the technological parameters of incremental sheet forming in order to increase the accuracy, reliability, and efficiency of manufacturing parts with complex shapes.

Keywords: incremental sheet forming, stress-strain state, utilized plasticity resource

Стаття надійшла до редакції / Received 17.03.2026

Прийнята до друку / Accepted 14.04.2026

Опубліковано / Published 28.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Баранов Владислав, Сухоруків Сергій

Постановка проблеми

Сучасне машинобудівне виробництво розвивається в двох напрямках: універсалізація виробів, що призводить до збільшення серійності виробництва і в свою чергу здешевлення продукції та в напрямку індивідуалізації виробів. Швидке переналагодження на виробництво нових деталей малими партіями дозволяє підприємству бути конкурентно здатним на ринку. На даний час в світі більше половини всіх заготовок виготовляється обробкою металів тиском. Основним напрямком розвитку методів обробки металів тиском є забезпечення технологічної спадковості виробів з листових заготовок. Одним з напрямків удосконалення обробки листових заготовок в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва є дослідження процесів локального деформування. Перевагою таких процесів є точкове прикладання зовнішнього навантаження, що зменшує енергозатрати та підвищує пластичні властивості матеріалу. Одним з таких методів є метод пошарового локального деформування (Incremental Metal Forming) листових заготовок.

Аналіз досліджень та публікацій

Пошарове локальне деформування - процес деформування листового металу, у якому пуансон, торець якого заокруглений, переміщується вздовж заданої траєкторії і утворює локальну зону деформування. Даний процес подібний до ротаційної витяжки листових заготовок. Дослідженням процесу пошарового локального деформування листових заготовок займаються науковці Індії, Китаю, США та ЄС. Роботи науковців направлені на вивчення поведінки металу в процесі деформування та вплив параметрів процесу на силові характеристики та

якість отриманої заготовки [1,2,3,4]. Основними методами досліджень є експериментальні випробування та імітаційне моделювання.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є аналіз сучасного стану досліджень процесу пошарового локального деформування листових заготовок та визначення впливу основних параметрів процесу на напружено-деформований стан та якість отриманих виробів.

Результати та їх обговорення

Розвиток сучасного програмного забезпечення розширює сфери застосування методу пошарового локального деформування, оскільки даний метод не вимагає виготовлення спеціального інструменту [5], тобто відсутні традиційні для штампування матриця і пуансон, та може виконуватися на верстаті з ЧПК [6] або промислового роботі.

Існує три основних підвиди пошарового локального деформування: односточкове пошарове локальне деформування (Single Point Incremental Forming, SPIF); двоточкове пошарове локальне деформування (Two-Point Incremental Forming, TPIF) та двостороннє пошарове локальне деформування (Double-Sided Incremental Forming, DSIF).

При односточковому пошаровому локальному деформуванні інструменту рухається по заданій траєкторії та видавлює листову заготовку (див. рис.1 а). Головним недоліком такої схеми деформування є пружна віддача матеріалу заготовки зумовлена відсутністю підтримки заготовки з вільної сторони, що негативно впливає на геометричну точність отриманої заготовки [7]. Крім того, максимальна деформація, за крок, обмежена співвідношенням максимального кута стінки отриманої деталі та величиною потоншення матеріалу заготовки.

При двоточковому пошаровому локальному деформуванні додатково до основного інструменту на зворотній стороні заготовки розміщують нерухому матрицю (див. рис.1 б), що робить такий метод наближеним до ротаційної витяжки [8]. Матриця забезпечує підтримку матеріалу заготовки, що значно підвищує жорсткість всієї системи. Це суттєво підвищує геометричну точність отриманих заготовок. Недоліком такої схеми процесу є необхідність виготовлення нерухокої матриці окремо під кожну деталь.

Найбільш складною з огляду на організацію, але найбільш гнучкою, є схема двостороннього пошарового локального деформування [9]. В ній застосовуються два незалежних один від одного інструменти, які розташовані по різні сторони від заготовки. Один з них формує поверхню, інший – виконує функції локальної динамічної підтримки. Це дозволяє формувати вигнуто-випуклі поверхні, створювати деталі з різнонаправленими кутами нахилу стінок. Проте, при використанні даної схеми деформування, необхідно використовувати два роботи, які отримують команди від складної системи синхронного керування.

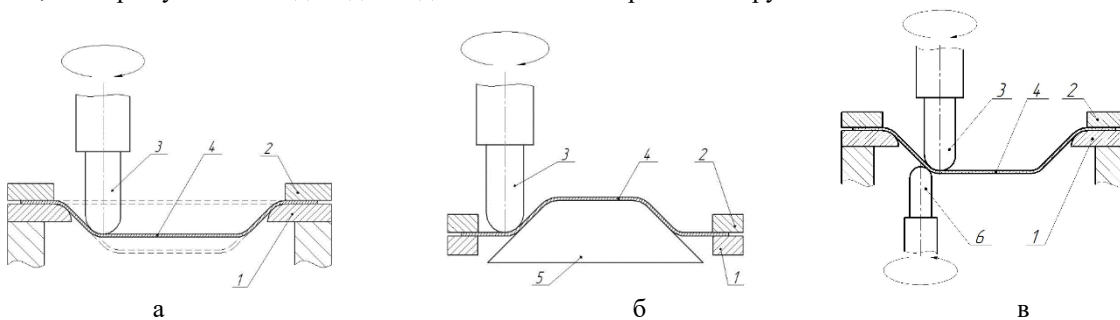


Рис. 1. Принципова схема пошарового локального деформування а) односточкове пошарове локальне деформування, б) двоточкове пошарове локальне деформування, в) двостороннє пошарове локальне деформування
1 - нижня плита, 2 - притиск, 3 - пуансон; 4 - заготовка, 5 - опорна матриця, 6 - контрпуансон

Основними параметрами процесу пошарового локального деформування, що досліджуються науковцями в світі, є траєкторія руху інструменту, швидкість переміщення інструменту, швидкість обертання інструменту, крок деформування, радіус інструменту та вплив мастила.

В роботі [4] представлені результати дослідження впливу траєкторії руху інструменту на якість поверхні заготовки. Крок деформування обирається в межах від 0,1 мм і до 0,8 мм, в залежності від товщини заготовки та радіусу контактної поверхні інструменту. Найбільше розповсюдження отримали такі траєкторії руху: пошарове деформування (рис. 2, а) та гвинтове деформування (рис. 2, б)

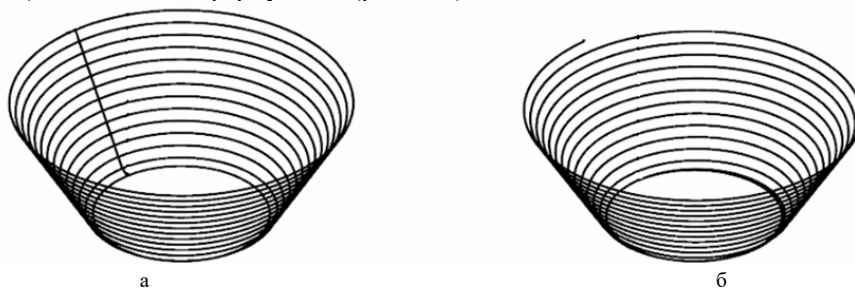


Рис. 2. Траєкторія руху інструменту при пошаровому локальному деформуванні а) пошарове деформування, б) гвинтове деформування

Застосування пошарової деформації з фіксованим кроком спрощує формування програми керування рухом інструмента, а застосування гвинтової траєкторії деформування дозволяє уникнути появи точки переходу інструменту між шарами.

Сучасні дослідники пропонують корегувати, за допомогою методів скінчених елементів, траєкторію руху інструменту для компенсації пружної віддачі заготовки. Інший шлях покращення напружено-деформованого стану, в небезпечних з точки зору руйнування зонах, є деформування заготовок за два проходи [8, 10].

На відміну від класичних методів деформування листових заготовок, при використанні пошарового локального деформування з'являється можливість збільшення граничних деформацій матеріалу заготовки, за рахунок складного напружено-деформованого стану в зоні контакту інструменту та заготовки. Так, при переміщенні інструменту вздовж траєкторії руху ми отримуємо розтягуючі деформації, при збільшенні товщини листа зростають деформації зсуву [11].

Згідно результатів дослідження швидкість подачі інструменту впливає на час процесу, рівень деформованості матеріалу та шорсткість поверхні деталі після формозміни. Так збільшення швидкості подачі інструменту дозволяє зменшити загальний час обробки, проте одночасно з цим знижує деформованість матеріалу заготовки.

В роботі [12] виявлено що при пошаровому локальному деформуванні листів алюмінію зі зменшенням швидкості подачі відбувається збільшення температури в контактній зоні, що, призводить до підвищення деформованості матеріалу заготовки. За результатами досліджень [13] було визначено що зміна швидкості подачі інструмента від 500 мм/хв до 1500 мм/хв, не мала суттєвого впливу на точність та міцність заготовки після формозміни. При пошаровому локальному деформуванні листових заготовок з $TiAl_2Mn_{1.5}$ у гарячому стані дослідники [14] досягли підвищення пластичності матеріалу за рахунок зменшення швидкості подачі інструменту до 400 мм/хв та додаткового нагріву заготовки, що дозволило їм уникнути появи дефектів.

На збільшення пластичності матеріалу заготовки, також впливає підвищення швидкості обертання інструменту (пуансону). Це відбувається за рахунок тертя між заготовкою та інструментом і призводить до підвищення температури в зоні деформування при великих швидкостях обертання. Проте великі швидкості обертання інструменту можуть збільшувати залишкову шорсткість поверхні zdeформованої заготовки.

В роботах [9, 11, 12] було проаналізовано вплив кроку зміщення інструменту. Виявлено, що при збільшенні кроку суттєво скорочується час виготовлення деталі, проте зменшується пластичність матеріалу заготовки. Це призводить до збільшення напружень в зоні деформування та передчасної появи дефектів у вигляді мікротріщин. В роботі [7] також виявлено, що збільшення кроку переміщення інструменту призводить до збільшення зусиль деформування та спричиняє збільшення шорсткості поверхні заготовки, а в деяких випадках може призвести до мікроруйнування поверхневого шару заготовки. В роботі [15] показано, що зменшення кроку інструмента призводить до більш рівномірного розподілу деформацій по товщині листа та зниження градієнтів напружень у небезпечних зонах. За результатами досліджень [16] відзначено, що за рахунок поєднання малих кроків деформування та підбору оптимального радіуса інструмента вдалось суттєво збільшити граничний кут нахилу стінки zdeформованої заготовки без втрати стійкості процесу.

Одним із чинників, які впливають на ефективність процесу пошарового локального деформування є характеристики обладнання, на якому відбувається процес формозмінення, а саме жорсткість системи ВПД. Найчастіше для даного процесу використовують фрезерні верстати з ЧПК та промислові роботи-маніпулятори. В роботах [17–19], проведено аналіз жорсткості обладнання, що використовується. Виявлено, що жорсткість фрезерних верстатів з ЧПК може досягати 200 кН/мм, а жорсткість промислових роботів-маніпуляторів, при інших рівних умовах, зазвичай не перевищує 120 кН/мм. Тому використання фрезерних верстатів з ЧПК дозволяє забезпечувати найбільшу геометричну точність zdeформованих заготовок. Незважаючи на нижчу жорсткість, саме роботи-маніпулятори отримали широке розповсюдження в дослідженнях процесів пошарового локального деформування, що пояснюється наявністю шести ступенів вільності, можливістю орієнтації інструмента під різними кутами до поверхні заготовки та більшою робочою зоною порівняно з фрезерними верстатами з ЧПК. Разом з тим, в промисловості роботи-маніпулятори застосовуються в обмеженому колі задач. Основною причиною такої ситуації є зменшення точності позиціонування робочого інструмента зі зростанням вантажопідйомності та величини робочої зони. Тому, при пошаровому локальному деформуванні листових заготовок великої товщини, найчастіше використовують фрезерні верстати з ЧПК [15]. Для дослідження напружено-деформованого стану в процесі двостороннього пошарового локального деформування, зазвичай, розробляються спеціалізовані установки [18–19].

Значну увагу в сучасних дослідженнях приділено аналізу напружено-деформованого стану та механізмів накопичення пошкоджень матеріалу листової заготовки. Так, в роботі [20] доведено, що при пошаровому локальному деформуванні переважає складний просторовий напружений стан, у якому поєднуються розтягуючі, зсувні та контактні напруження. Це принципово відрізняє даний процес від класичних методів витяжки і пояснює можливість реалізації підвищених граничних деформацій. В роботах інших дослідників [16] виявлено, що в зоні контакту інструменту та листової заготовки переважають деформації зсуву. А в робот [21] дослідники дійшли висновку, що класичні критерії граничних деформацій, які зазвичай застосовували для штампування, не можуть бути безпосередньо використані для опису процесів пошарового локального деформування. Тому для коректного опису напружено-деформованого стану листової заготовки в процесі пошарового локального деформування

мають враховувати умови неоднорідного зміцнення матеріалу та складного навантаження в зоні деформування. Оскільки процес пошарового локального деформування характеризується послідовним переміщенням зони деформування, врахування зміни геометрії поверхні на кожному етапі формозміни дозволяє підвищити точність прогнозу напружено-деформованого стану [22].

Руйнування матеріалу заготовки при пошаровому локальному деформуванні відбувається, як наслідок локального накопичення пошкоджень. Основними чинниками, що впливають на рівень деформації є траєкторія руху інструмента, крок деформування та властивості матеріалу заготовки [23, 24]. З іншого боку, при аналізі напружено-деформованого стану доцільно враховувати технологічну спадковість [25], тому що попередня історія деформування істотно впливає надійність тонкостінних конструкцій, їх експлуатаційні властивості та використаний ресурс пластичності. При цьому, локальний характер деформування призводить до неоднорідного розподілу використаного ресурсу пластичності матеріалу по тілу листової заготовки [26, 27]. Тому однією із задач при дослідженні процесу пошарового локального деформування є врахування історії деформування [28] та траєкторії руху інструмента при прогнозуванні моменту руйнування, тобто управління технологічною спадковістю виробу за рахунок вибору технологічних параметрів процесу.

Визначення величини використаного ресурсу пластичності можливе лише за допомогою чисельного моделювання [29]. При цьому, треба врахувати те, що процес пошарового локального деформування характеризується циклічним та локалізованим характером навантаження, тому стандартні критерії руйнування, які застосовуються для традиційних процесів листового формоутворення, потребують уточнення.

Висновки

Таким чином, аналіз сучасних досліджень процесу пошарового локального деформування свідчить про те, що більшість науковці зосередили свою увагу на визначенні впливу окремих параметрів процесу (кроку деформування, швидкості подачі, швидкості обертання інструмента, траєкторії руху) на геометричну точність, силові характеристики процесу та якість поверхні заготовок. Також, велика увага приділена визначенню граничних деформацій в готовому виробі, тоді як вплив параметрів процесу на інтенсивність накопичення пошкоджень та визначення використаного ресурсу пластичності матеріалу листової заготовки залишається недостатньо вивченим. Такі дослідження дозволять розробити рекомендації, щодо оптимізації режимів процесу деформування, підвищити стійкість процесу формозміни та розширити технологічні можливості процесу.

Література

1. Tomasz Trzepieciński Advances in sheet metal forming technologies // *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika* z. 84 (4/12) – 2012. – № 284. – С. 59-70.
2. Zettler J. Incremental sheet forming – process simulation with LS-DYNA / J. Zettler, H. Rezai, B. Taleb-Araghi, M. Bambach, G. Hirt // 6th German LS-DYNA forum (October, 11-12, 2007, Frankenthal, Germany), P. 9-20.
3. Park J.-J. Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique / J.-J. Park, Y.-H. Kim // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2003. – V. 140, Iss. 1-3. – P. 447-453.
4. Behera A.K. Single point incremental forming: An assessment of the progress and technology trends from 2005 to 2015 / A.K. Behera, R.A. de Sousa, G. Ingarao, V. Oleksik // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2017. – V. 27. – P. 37-62.
5. Centeno G. Critical analysis of necking and fracture limit strains and forming forces in single-point incremental forming / G. Centeno, I. Bagudanch, A.J. Martínez-Donaire, M.L. Garcia-Romeu, C. Vallellano // *Materials and Design*. – 2014. – V. 63. – P. 20-29.
6. Ziran X., Gao L., Hussain G., Cui Z. The performance of flat end and hemispherical end tools in single-point incremental forming // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2010. – V. 46, Iss. 9-12. – P. 1113-1118.
7. Jeswiet J., Adams D., Doolan M., McAnulty T., Gupta P. Single point and asymmetric incremental forming // *Advances in Manufacturing*. – 2015. – V. 3, Iss. 4. – P. 253-262.
8. Li M. Multi-point forming technology for sheet metal / M. Li, Z. Sui, Q.G. Yan // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2002. V. 129: – P. 333-338
9. Tisza M., Paniti I., Kovács P.Z. Experimental and numerical study of a milling machine-based dieless incremental sheet forming // *Journal of Material Forming*. – 2010. – V. 3, Iss. 1. – P. 971-974.
10. Сивак І.О. Напружений стан в осередку деформації листової заготовки під час ротаційної витяжки осесиметричних деталей / І.О. Сивак, С. І. Сухоруков, Є. І. Шевчук // *Наукові праці ВНТУ*. – Вінниця, 2014. – №4. – с. 6-11.
11. Eyckens P., He S., Van Bael A., Van Houtte P., Duflou J. Forming limit predictions for the serrated strain paths in single point incremental sheet forming // *AIP Conference Proceedings*. – 2007. – V. 908. – P. 141-146.
12. Szekeres A., Ham M., Jeswiet J. Force measurement in pyramid shaped parts with a spindle mounted force sensor. *Key Engineering Materials*. – 2007. – V. 344. – P. 551-558.
13. Rauch, M., Hascoet, J.-Y., Hamann, J.-C., & Plenel, Y. Tool path programming optimization for incremental sheet forming applications. *Computer-Aided Design*. 2009 – 41(12). – P. 877-885.

14. Fan G, Gao L (2014) Numerical simulation and experimental investigation to improve the dimensional accuracy in electric hot incremental forming of Ti-6Al-4V titanium sheet. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – v.72(5). – 2014. – P. 1133-1141
15. Jeswiet J., Micari F., Hirt G. et al. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, – Volume 54, Issue 2, – 2005, – P. 88-114.
16. Emmens W.C., Sebastiani G., van den Boogaard A.H. The technology of Incremental Sheet Forming. *Journal of Materials Processing Technology*, – Volume 210, Issue 8, – 1 June 2010, – P. 981-997.
17. Verbert J., Aereens R., Vanhove H., Aertbeliën E., Duflou J.R. Obtainable accuracies and compensation strategies for robot supported SPIF // *Key Engineering Materials*. – 2009. – V. 410-411. – P. 679-687.
18. Portman V.T. Stiffness evaluation of machines and robots: minimum collinear stiffness value approach // *Journal of Mechanisms and Robotics*. – 2011. – V. 3, Iss. 1. – P. 143-150.
19. Schafer T., Schraft R.D. Incremental sheet metal forming by industrial robots // *Rapid Prototyping Journal*. – 2005. – V. 11, Iss. 5. – P. 278-286.
20. Silva M.B., Nielsen, P.S, Bay N. Failure mechanisms in single-point incremental forming of metals. *Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2011. – V.56, – P. 893-903.
21. Filice L., Fratini L., Micari F. Analysis of material formability in incremental forming // *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. – 2002. – V. 51, Iss. 1. – P. 199-202.
23. Кухар В. В. Методика розрахунку напружено-деформованого стану листової заготовки при гнутті з врахуванням зміцнення матеріалу / В. В. Кухар, О. С. Аніщенко, М. М. Нагнібеда // *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХП», 2017. – №37(1259). – С. 36-41
24. Jackson K., Allwood J. The mechanics of incremental sheet forming // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – V. 209, Iss. 3. – P. 1158-1174.
24. Malhotra R., Xue L., Belytschko T., Cao J. Mechanics of fracture in single point incremental forming // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2012. – V. 212, Iss. 7. – P. 1573-1590.
25. Огородніков В. А. Керування технологічною спадковістю при листовому штампуванні з метою підвищення безпеки конструкцій / В. А. Огородніков, В. Є. Перлов, С. В. Войтків // *Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Серія «Машинобудування»*. – 2010. - № 60. – С. 133-137
26. Duflou J.R., Habraken A.M., Cao J. et al. Single point incremental forming: state-of-the-art and prospects. *International Journal of Material Forming*. – 2018. – V. 11. – P. 743-773.
27. Bambach M. A geometrical model of the kinematics of incremental sheet forming. *CIRP Annals*. – 2010. – V. 210, Issue 12, – P. 1562-1573.
28. Young D., Jeswiet J. Wall thickness variations in single-point incremental forming // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2004. – V. 218, Iss. 11. – P. 1453-1459.
29. Gatea S., Ou H., McCartney G. Review on the influence of process parameters in incremental sheet forming. *Journal of Materials Processing Technology*. – 2016. – V. 87. – P. 479-499.

References

1. Tomasz Trzepieciński Advances in sheet metal forming technologies // *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika z. 84* (4/12) – 2012. - № 284. – С. 59-70.
2. Zettler J. Incremental sheet forming – process simulation with LS-DYNA / J. Zettler, H. Rezaei, B. Taleb-Araghi, M. Bambach, G. Hirt // 6th German LS-DYNA forum (October, 11-12, 2007, Frankenthal, Germany), – P. 9-20.
3. Park J.-J. Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique / J.-J. Park, Y.-H. Kim // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2003. – V. 140, Iss. 1-3. – P. 447-453.
4. Behera A.K. Single point incremental forming: An assessment of the progress and technology trends from 2005 to 2015 / A.K. Behera, R.A. de Sousa, G. Ingarao, V. Oleksik // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2017. – V. 27. – P. 37-62.
5. Centeno G. Critical analysis of necking and fracture limit strains and forming forces in single-point incremental forming / G. Centeno, I. Bagudanch, A.J. Martínez-Donaire, M.L. Garcia-Romeu, C. Vallengano // *Materials and Design*. – 2014. – V. 63. – P. 20-29.
6. Ziran X., Gao L., Hussain G., Cui Z. The performance of flat end and hemispherical end tools in single-point incremental forming // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2010. – V. 46, Iss. 9-12. – P. 1113-1118.
7. Jeswiet J., Adams D., Doolan M., McAnulty T., Gupta P. Single point and asymmetric incremental forming // *Advances in Manufacturing*. – 2015. – V. 3, Iss. 4. – P. 253-262.
8. Li M. Multi-point forming technology for sheet metal / M. Li, Z. Sui, Q.G. Yan // *Journal of Materials Processing Technology*, – 2002. – V. 129: – P. 333-338
9. Tisza M., Paniti I., Kovács P.Z. Experimental and numerical study of a milling machine-based dieless incremental sheet forming // *Journal of Material Forming*. – 2010. – V. 3, Iss. 1. – P. 971-974.
10. Syvak I.O. Napruzhenyi stan v osередku deformatsii lystovoi zahotkovky pid chas rotatsiinoi vtyazhky osesymetrychnykh detalei / I.O. Syvak, S. I. Sukhorukov, Ye. I. Shevchuk // *Naukovi pratsi VNTU*. – Vinnytsia, 2014. – №4. – P. 6-11.
11. Eyckens P., He S., Van Bael A., Van Houtte P., Duflou J. Forming limit predictions for the serrated strain paths in single point incremental sheet forming // *AIP Conference Proceedings*. – 2007. – V. 908. – P. 141-146.
12. Szekeres A., Ham M., Jeswiet J. Force measurement in pyramid shaped parts with a spindle mounted force sensor. *Key Engineering Materials*. – 2007. – V. 344. – P. 551-558.
13. Rauch, M., Hascoet, J.-Y., Hamann, J.-C., & Plenel, Y. (2009). Tool path programming optimization for incremental sheet forming applications. *Computer-Aided Design*, – 41(12), – P. 877-885.

14. Fan G, Gao L (2014) Numerical simulation and experimental investigation to improve the dimensional accuracy in electric hot incremental forming of Ti-6Al-4V titanium sheet. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* v.72(5). – 2014, – P. 1133–1141
15. Jeswiet J., Micari F., Hirt G. et al. Asymmetric single point incremental forming of sheet metal. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, – Volume 54, Issue 2, – 2005, – P. 88-114.
16. Emmens W.C., Sebastiani G., van den Boogaard A.H. The technology of Incremental Sheet Forming. *Journal of Materials Processing Technology*, – Volume 210, Issue 8, – 1 June 2010, – P. 981-997.
17. Verbert J., Aerens R., Vanhove H., Aertbeliën E., Dufloy J.R. Obtainable accuracies and compensation strategies for robot supported SPIF // *Key Engineering Materials*. – 2009. – V. 410-411. – P. 679-687.
18. Portman V.T. Stiffness evaluation of machines and robots: minimum collinear stiffness value approach // *Journal of Mechanisms and Robotics*. – 2011. – V. 3, Iss. 1. – P. 143-150.
19. Schafer T., Schraft R.D. Incremental sheet metal forming by industrial robots // *Rapid Prototyping Journal*. – 2005. – V. 11, Iss. 5. – P. 278-286.
20. Silva M.B., Nielsen, P.S, Bay N. Failure mechanisms in single-point incremental forming of metals. *Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2011. – V.56, – P. 893-903.
21. Filice L., Fratini L., Micari F. Analysis of material formability in incremental forming // *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. – 2002. – V. 51, Iss. 1. – P. 199-202.
22. Kukhar V. V. Metodyka rozrakhunku napruzhenno-deformovanoho stanu lystovoi zahotovky pry hnutti z vrakhuvanniam zmitsnennia materialu / V. V. Kukhar, O. S. Anishchenko, M. M. Nahnibeda // *Visnyk NTU «KhPI»*. Serii: Innovatsiini tekhnolohii ta obladdannia obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhii. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2017. – №37(1259). – P. 36–41
23. Jackson K., Allwood J. The mechanics of incremental sheet forming // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – V. 209, Iss. 3. – P. 1158-1174.
24. Malhotra R., Xue L., Belytschko T., Cao J. Mechanics of fracture in single point incremental forming // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2012. – V. 212, Iss. 7. – P. 1573-1590.
25. Ohorodnikov V. A. Keruvannia tekhnolohichnoiu spadkovistiu pry lystovomu shtampuvanni z metoiu pidvyshchennia bezpeky konstruktсии / V. A. Ohorodnikov, V. Ye. Perlov, S. V. Voitkiv // *Visnyk natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut» Serii «Mashynobuduvannia»*. – 2010. – № 60. – P. 133-137
26. Dufloy J.R., Habraken A.M., Cao J. et al. Single point incremental forming: state-of-the-art and prospects. *International Journal of Material Forming*. – 2018. – V. 11. – P. 743-773.
27. Bambach M. A geometrical model of the kinematics of incremental sheet forming. *CIRP Annals*. – V. 210, Issue 12, – 2010. – P. 1562-1573.
28. Young D., Jeswiet J. Wall thickness variations in single-point incremental forming // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2004. – V. 218, Iss. 11. – P. 1453-1459.
29. Gatea S., Ou H., McCartney G. Review on the influence of process parameters in incremental sheet forming. *Journal of Materials Processing Technology*. – 2016. – V. 87. – P. 479-499.