

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-86>
УДК 621.744

РИБІН ЄВГЕН

Вінницький національний технологічний університет
<https://orcid.org/0009-0005-8714-5943>
e-mail: evhenii.rybin@gmail.com

СУХОРОКОВ СЕРГІЙ

Вінницький національний технологічний університет
<https://orcid.org/0000-0003-4201-1691>
e-mail: suhorukov@vntu.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРЯМКІВ ПОКРАЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАГОТОВОК З ПІНОПОЛІСТИРОЛУ

В роботі наведено результати аналізу сучасного стану досліджень процесу різання пінополістирольних плит дротяним електродом. Розглянуто результати досліджень впливу характеристик робочого інструменту, температурних показників процесу різання на якість та точність отриманих заготовок. Визначено напрямки подальших досліджень.

Ключові слова: дротяний електрод, пінополістирольна заготовка, лиття за моделями, що газифікуються.

RYBIN YEVHENII

SUKHORUKOV SERGIY

Vinnitsia National Technical University

RESEARCH OF DIRECTIONS FOR IMPROVING THE ACCURACY OF MANUFACTURING BLANKS FROM FOAM POLYSTYRENE

One of the highly efficient methods of manufacturing blanks is casting using lost foam patterns. Due to small processing allowances, such blanks have a high material utilization rate. The main requirements for such models are the accuracy and quality of the resulting surfaces. In small-scale and single-piece production, blanks for casting using lost foam patterns are made of polystyrene foam using cutting with a heated wire electrode. This provides a number of advantages, namely, the cleanliness of the treated surface, the cutting speed, and the absence of fine waste.

This study analyzes the current state of research into the process of cutting polystyrene foam blanks with a wire electrode.

The factors analyzed by modern researchers of the process of cutting polystyrene foam blanks with a wire electrode can be divided into 3 separate groups: the influence of material properties, the influence of process parameters, and the influence of tool geometry.

The largest share of factors influencing the characteristics of the process parameters are the energy parameters of the cutting process. When the heated wire and the workpiece material come into contact, heat is transferred from the wire to the workpiece in different ways: direct heat transfer, convection and radiation. It was found that the energy transfer from the heated wire to the polystyrene foam leads to both the melting and evaporation of the polystyrene foam from the contact zone and a significant decrease in the temperature of the wire itself, which over time leads to changes in the heat balance in the cutting zone.

In the analyzed studies of foreign scientists, it was found that the characteristics of the workpiece material, the power of the energy supplied to the point of contact between the workpiece and the working tool and the speed of movement of the tool relative to the workpiece have the greatest influence on the energy parameters of the process.

For a comprehensive study of the process of cutting polystyrene foam blanks with a wire electrode, modern researchers use the finite element method.

The development of mathematical models that take into account the stretching and bending of the wire electrode during the cutting process can improve the accuracy of predicting the size of the cutting width and the geometric accuracy of the resulting workpieces.

Keywords: wire electrode, polystyrene foam blank, lost foam casting.

Стаття надійшла до редакції / Received 01.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 06.06.2025

Постановка проблеми

Сучасний стан розвитку економіки розвиненої держави вимагає від підприємств швидко реагувати на зміну стану ринку та запитів від споживачів. Це, в свою чергу, спонукає виробників машинобудівної продукції швидко переналагоджувати виробництва та змінювати номенклатуру товарів, що випускається. Для цього на сучасних машинобудівних підприємствах впроваджують високоефективні методи виготовлення заготовок та їх обробки [1]. Один з таких методів отримання заготовок є лиття за моделями, що газифікуються. За рахунок малих припусків на обробку заготовки, виготовлені методом лиття за моделями, що газифікуються, мають високий коефіцієнт використання матеріалу. Основними вимогами, до таких моделей, є точність та якість отриманих поверхонь [2, 3]. Дані показники, в першу чергу, залежать від точності моделі, яка виготовляється з пінополістиролу. Існує декілька методів виготовлення моделей: в серійному виробництві моделі виготовляють зі спіненого пінополістиролу, в дрібносерійному та одиничному виробництві - вирізанням з пінополістирольних плит за допомогою фрезерування або різання розігрітим інструментом [4, 5]. Виготовлення моделей з пінополістиролу за допомогою дротяного електрода має низку переваг перед фрезеруванням, а саме, чистота обробленої поверхні, швидкість різання та відсутність дрібнодисперсних відходів.

Аналіз досліджень та публікацій

Вивченню питань застосування дротяного електрода, у якості робочого органа на верстатах з ЧПК при виготовленні заготовок для лиття моделей, що газифікуються, присвятили свої наукові дослідження

українські та іноземні науковці, а саме В. Дорошенко, П. Калюжний, Н. Brooks, S. Lee, D. Aitchison. В роботах даних авторів наводяться результати досліджень впливу характеристик дротяного електрода, режимів різання, щільності матеріалу заготовки на величину різі та якість отриманих поверхонь. Визначено рекомендовані межі швидкості переміщення робочого інструменту, температурні показники та інші характеристики процесу різання пінополістирольних заготовок.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є аналіз напрямків покращення точності виготовлення заготовок для лиття моделей, що газифікуються, за допомогою розігрітого дротяного електрода.

Виклад основного матеріалу

На сьогодні в світі основним способом дослідження процесу різання дротом є експериментальні дослідження. За допомогою них визначають оптимальні параметри процесу різання для кожного з досліджуваних методів.

Зазвичай, фактори, які аналізують дослідники, можна поділити на 3 окремих групи: вплив властивостей матеріалу, вплив параметрів процесу та вплив геометрії інструменту.

Найбільш перспективним напрямком з покращення якості та точності виготовлення моделей з пінополістеролу в умовах дрібносерійного виробництва є використання автоматизованих мехатронних систем з дротяним електродом у якості інструменту.

Для визначення поведінки пінополістиролу в процесі різання гарячим дротом частіше за все аналізують механіку плавлення матеріалу під дією високих температур. При цьому більшість дослідників застосовують методи імітаційного моделювання для дослідження поведінки матеріалів при нагрів. Проте для проведення моделювання, дуже часто, вони застосовують довідникові дані, які можуть носити усереднені значення або спрощені характеристики. Так D. Ahn та ін. [6] в своїх дослідженнях приймають температуру плавлення пінополістиролу на основі точки плавлення твердого кристалічного пінополістиролу замість пінного аморфного пінополістиролу, з який частіше за все використовується в даному процесі. Також в процесі налаштування процесу моделювання ці дослідники використовували обмежений температурний діапазон значень поведінки матеріалу зі зміною температури. Для розширення діапазону значень вони екстраполювали необхідні дані за межі початкового діапазону, що призвело до неможливості підтвердження достовірності отриманих результатів імітаційного моделювання. Такий підхід, є можливим лише у випадках, коли інформація про властивості матеріалу в різних напрямках в середині заготовки відсутня, або ці дані мають обмежений режим використання.

Для дослідження явища анізотропії властивостей пінополістиролу дана група дослідників проводили перевірку властивостей різання заготовок в різних напрямках. Для цього вони проводили випробування різання, щоб визначити зв'язок між максимальною швидкістю різання та тепловим впливом у розгорнутому та поперечному напрямках для визначення ефектів анізотропії листа пінополістиролу (див. рис. 1). В результаті проведених експериментів вони визначили, що максимальна швидкість різання відрізнялась на 30% для різних напрямків. Це зумовлено особливостями внутрішньої будови заготовок з пінополістиролу та особливостями технологічного процесу виготовлення та заповнення матеріалом відповідних форм.

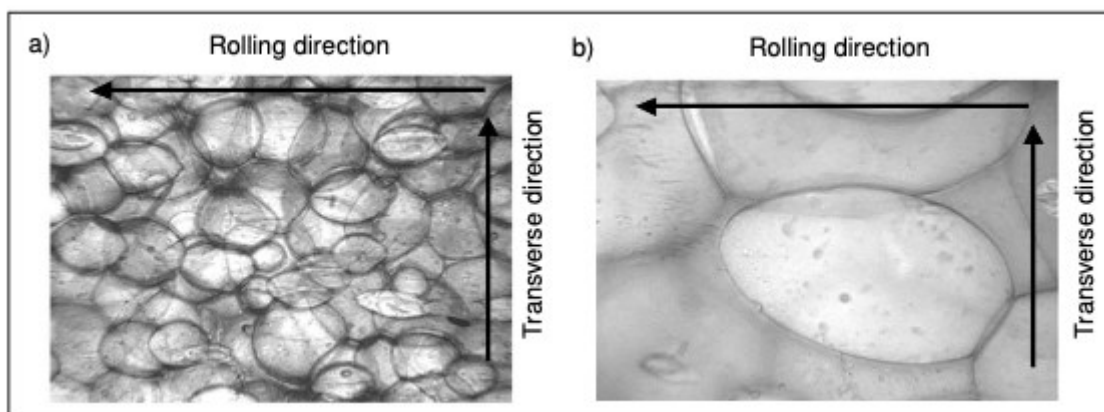


Рис. 1. Мікроструктура пінополістирольного листа. (а) Збільшено в 100 разів. (б) Збільшено в 400 разів [6]

В роботі [7] Hadley Brooks при проведенні експериментів з пінополістиролом виявив, що при температурі вище 110 °C пухирці матеріалу починають ітенсивно змінювати сферою форму. При цьому щільність та величина пухирців майже не впливає на дану температуру. В роботі також вказано, що передача енергії від нагрітого дроту до пінополістиролу призводить, як до плавлення та випаровування пінополістиролу з зони контакту так і суттєвого зниження температури самого дроту, що в часі призводить до змін в тепловому балансі в зоні різання.

Також Н. Brooks провів дослід з зміни температури дроту при проходженні через матеріал, тобто величину термовтрат нагрітого дроту (див. рис. 2). Згідно наведених в роботі результатів, при прорізання

заготовки з пінополістиролу шириною 40 мм падіння температури дроту в центрі заготовки складало 60 °С, а середня температура дроту складала 260 °С.

Найбільшу частку факторів, що впливають на характеристики параметрів процесу складають енергетичні параметри процесу різання.

При контакті нагрітого дроту та матеріалу заготовки передача тепла від дроту до заготовки відбувається різними шляхами. Більшість дослідників розподіляють їх на такі види: безпосередня передача тепла, конвекція та випромінювання.

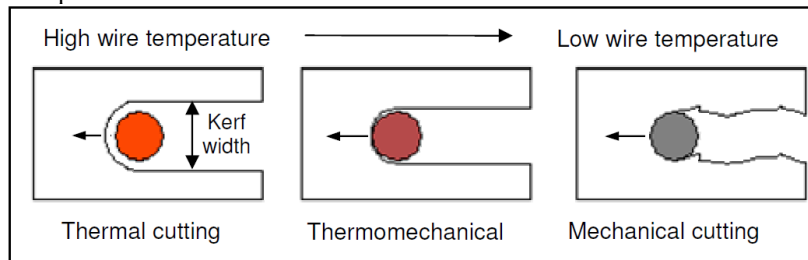


Рис. 2. Механізм процесу різання в залежності від температури дріт'яного електрода [7]

В проаналізованих дослідженнях закордонних науковців було виявлено, що найбільший вплив на енергетичні параметри процесу мають характеристики матеріалу заготовки (властивості поглинання тепла), потужність енергії підведена до точки контакту заготовки та робочого інструменту та швидкість переміщення інструменту відносно заготовки.

Основним інструментом, що застосовується в процесі різання пінополістирольних заготовок є розігрітий дріт'яний електрод. Нагрівання дроту відбувається за рахунок протікання через нього електричного струму.

Експериментальну перевірку достовірності результатів розрахунку потужності енергії провела група дослідників з Корейського інституту науки та технологій під керівництвом D. Ahn [6]. Вони провели ряд натурних експериментів для дослідження зв'язку між ефективним тепловим потоком та швидкістю різання.

Автори визначили сумісний вплив швидкості та величини електричного струму на розмір утвореного різі. При цьому ширина різі майже лінійно залежить від ефективної потужності.

При проведенні імітаційного моделювання процесу різання за допомогою методу скінчених елементів група дослідників на чолі D. Ahn використовували у якості початкової температури плавлення пінополістиролу 240°C. Під час досліджень впливу теплового потоку на ширину пропилю вони приймали такі припущення: відсутність конвекції, відсутність зміни температури в місці контакту інструменту та заготовки та інші, що суттєво вплинуло на достовірність отриманих результатів.

Найбільш повну математичну модель взаємодії нагрітого дроту та заготовки з пінополістиролу розробили N. Karmakar та S. Subbiah. В роботі [8] вони запропонували термодинамічну модель взаємодії, яка враховувала: теплофізичні властивості дроту; температуру фазових переходів та перетворень пінополістиролу; термічну взаємодію нагрітого дроту та пінополістиролу; розподіл температурних втрат в залежності від форми пропилю; конвективні втрати тепла від дроту до повітря; конвективні втрати тепла від дроту до пінопласту.

Наступним параметром, який впливає на точність утвореного різі є сила різання. Всі проаналізовані результати досліджень дають однаковий висновок. При низькій швидкості різання ми отримуємо невеликі сили різання, а в результаті більший вплив ефективної потужності теплового потоку, що в свою чергу призводить до збільшення ширини різі за рахунок оплавлення. Це спотворює розміри заготовки та точність отриманої поверхні. При високих швидкостях різання, тепловий потік є недостатнім для утворення теплового різі, тому відбувається механічне прорізання заготовки. Це призводить до руйнування країв різі по поверхням ядер матеріалу.

Висновки

Проведений аналіз досліджень процесу різі дріт'яним електродом пінополістирольних заготовок, дає можливість виділити основні напрямки подальших досліджень. Найбільш продуктивним способом проведення досліджень є імітаційне моделювання з використанням методу скінчених елементів. Головним обмеженням для цього є складність розробки достовірної математичної моделі матеріалу заготовки, з врахуванням наявної анізотропії, та врахування всіх видів теплової взаємодії матеріалу заготовки та інструменту.

Одним із факторів, що не враховані попередніми дослідниками є вплив сили натягнення дроту на якість отриманої поверхні та його довговічність, а відповідно і рекомендований діапазон режимів різання. Розробка математичних моделей, які враховують розтяг та згин дріт'яного електрода можуть підвищити точність прогнозування розміру ширини різі та геометричної точності отриманих заготовок.

Література

1. Панащук О.С. Дрібносерійне виробництво металопродукції як початковий крок до відновлення машинобудування / О.С. Панащук, В.С. Дорошенко, С.І. Клименко // XVI Міжнародна науково-технічна конференція *Нові матеріали і технології в машинобудуванні - 2024*: матеріали наук.-техн. конф. 25-26 квітня 2024 р., Київ / заг. ред. Р. В. Лютий. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – С. 280-284.
2. Шинський В.О. Сучасний стан і перспективи розвитку процесу лиття металу за моделями, що газифікуються / В.О. Шинський, В.С. Дорошенко, С.І. Клименко // *Метал і лиття України*. – 2023. – № 3. С. 29-38. <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.03.029>.
3. Рибін Є.В. Фактори, що впливають на якість поверхонь заготовок, виготовлених з пінополістиролу за допомогою дротяного електрода / Є.В. Рибін, С.І. Сухоруков // *Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи* (МН-2024) Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mccs/mn2024/paper/view/21724/18098>.
4. Сергієнко О.С. Метод виготовлення моделей для лиття за газифікованими моделями в одиничному виробництві / О.С. Сергієнко, Д.Ю. Ревенко // *Тиждень науки-2022*. Тези доповідей науково-практичної конференції, Запоріжжя, 18–22 квітня 2022 р. [Електронний ресурс] / Редкол. :В. В. Наумик (відпов. ред.) Електрон. дані. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2022 – С. 243-245.
5. Дорошенко В. С. Різноманітність литих конструкцій як один із індикаторів розвитку ливарного виробництва / В. С. Дорошенко, О. Б. Янченко // *Перспективи розвитку машинобудування та транспорту*: збірник тез доп. II-ї Міжнародн. наук.- техн. конф., Вінниця, 13-15 травня 2021 р. – Вінниця: МОН України, ВНТУ, 2021. С. 319-321.
6. Ahn D. G. Investigation into thermal characteristics of linear hotwire cutting system for variable lamination manufacturing (VLM) process by using expandable polystyrene foam / D. G. Ahn, S. H. Lee, and D. Y. Yang // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42. – 2002. – P. 427-439,
7. Brooks H.L. Plastic foam cutting mechanics for rapid prototyping and manufacturing purposes [Ph.D. thesis]. University of Canterbury; 2009. – 221 p.
8. Karmakar N. A comprehensive numerical model for kerf width prediction in hot wire cutting of expanded polystyrene / N. Karmakar and S. Subbiah, // *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 61, 2021. – PP. 322–333.

References

1. Panashchuk O.S. Dribnoseriine vyrobnytstvo metaloproduksii yak pochatkovyi krok do vidnovlennia mashynobuduvannia / O.S. Panashchuk, V.C. Doroshenko, S.I. Klymenko // XVI Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia Novi materialy i tekhnolohii v mashynobuduvanni - 2024: materialy nauk.-tekhn. konf. 25-26 kvitnia 2024 r., Kyiv / zah. red. R. V. Liutyi. – Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2024. – S. 280-284.
2. Shynskiy V.O. Suchasnyi stan i perspektyvy rozvytku protsesu lyttia metalu za modeliamy, shcho hazyfikuiutsia / V.O. Shynskiy, V.C. Doroshenko, S.I. Klymenko // Metal i lyttia Ukrainy. – 2023. – № 3. S. 29-38. <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.03.029>.
3. Rybin Ye.V. Faktory, shcho vplyvaiut na yakist poverkhon zahotovok, vyhotovlenykh z pinopolistyrolu za dopomohoiu drotianoho elektroda / Ye.V. Rybin, S.I. Sukhorukov // Molod v nautsi: doslidzhennia, problemy, perspektyvy (MN-2024) Rezhym dostupu: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mccs/mn2024/paper/view/21724/18098>.
4. Serhiienko O.S. Metod vyhotovlennia modelei dlia lyttia za hazyfikovanyimi modeliamy v odyynchnomu vyrobnytstvi / O.S. Serhiienko, D.Yu. Revenko // Tyzhden nauky-2022. Tezy dopovidei naukovo-praktychnoi konferentsii, Zaporizhzhia, 18–22 kvitnia 2022 r. [Elektronnyi resurs] / Redkol. :V. V. Naumyk (vidpov. red.) Elektron. dani. – Zaporizhzhia : NU «Zaporizka politekhnika», 2022 – S. 243-245.
5. Doroshenko V. S. Riznomanitnist lytykh konstruksii yak odyin iz indykatoriv rozvytku lyvarnogo vyrobnytstva / V. S. Doroshenko, O. B. Yanchenko // Perspektyvy rozvytku mashynobuduvannia ta transportu: zbirnyk tez dop. II-yi Mizhnarodn. nauk.- tekhnichn. konf., Vinnytsia, 13-15 travnia 2021 r. – Vinnytsia: MON Ukrainy, VNTU, 2021. S. 319-321.
6. Ahn D. G. Investigation into thermal characteristics of linear hotwire cutting system for variable lamination manufacturing (VLM) process by using expandable polystyrene foam / D. G. Ahn, S. H. Lee, and D. Y. Yang // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42. – 2002. – P. 427-439,
7. Brooks H.L. Plastic foam cutting mechanics for rapid prototyping and manufacturing purposes [Ph.D. thesis]. University of Canterbury; 2009. – 221 p.
8. Karmakar N. A comprehensive numerical model for kerf width prediction in hot wire cutting of expanded polystyrene / N. Karmakar and S. Subbiah, // *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 61, 2021. – PP. 322–333.