

Данилець Ю. Ю.
Ткачов В. Ю.
Чухліб В. Л.
Тимофєєв В. Д.
Ходирєв Г. П.

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИ ЛИСТОВОМУ ШТАМПУВАННІ U-ПОДІБНОЇ ДЕТАЛІ ЗІ ЗМІННИМ РАДІУСОМ ЗГИНАННЯ

В статі розглянуто методики з виконання операції листового штампування згинання для виготовлення різноманітних деталей для різних галузей промисловості і особливо в сучасному світі. При дослідженні матеріалу основну увагу приділено різновидам операції згнуття та їх застосування для отримання U-подібної деталі. При цьому увагу приділено основним параметрам формозміни при згинанні, а саме радіусу згинання листового матеріалу. Внаслідок цього для дослідження було обрано комп'ютерне моделювання операції згинання зі змінним радіусом на нижньому штампі. Основним результатом роботи є визначення впливу радіуса згинання на зміну інтенсивності напружень, опору деформації, пластичної деформації, швидкості деформації та силового навантаження процесу згинання при отриманні U-подібної деталі при листовому штампуванні.

Виявлено, що збільшення радіуса згинання призводить до наступних результатів: зменшення показників інтенсивності напружень та опору деформації має приблизно однакову величину і складає біля 7%, а значення пластичної деформації знижуються на 24%, але саме суттєво при цьому є зниження силового навантаження на 21 %. Результати моделювання процесу листового штампування при згинанні показали бездефектність виготовлення деталі за вибраними параметрами і перевагу обрання варіанту нижнього штампі з радіусом 5 мм, що підтверджено зниженням показань сили, що потрібна для штампування, а також напружень та пластичної деформації.

Ключові слова: згинання, листове штампування, деформація, напруження, операція.

Листове штампування відіграє значну і важливу роль у багатьох галузях, особливо в автомобільній та транспортній індустрії [1, 2].

Згинання листового металу — одна з основних операцій листового штампування для деталей, які широко використовуються в машинобудуванні, авіабудуванні, енергетичному секторі та побутовій техніці [1]. Популярність даного процесу пояснюється його високою ефективністю, стабільністю геометричних параметрів виробів та низькою собівартістю. Найпоширенішим процесом формування листового металу є процес згинання, який може створювати U-подібну форму вздовж осі матеріалу шляхом прикладання сили до листового металу, змушуючи його згинатися у потрібну форму. Це робиться з різних матеріалів, які мають гарні пластичні властивості. Такі матеріали використовуються у гальмах та спеціалізованих машинних процесах [3]. При методі стирання лист має утримуватися проти матриці за допомогою стискаючого підкладного елемента, змушуючи його згинатися вздовж радіусу. Існують два основні аспекти якості при згинанні листового металу, які включають, але не обмежуються, пластичністю та розмірами і при цьому мінімізація відхилень у розмірах є ключовою вимогою у масовому виробництві [4].

Відомо, що розвиток четвертої промислової революції спричинить зміни у всіх галузях та технологічних процесах. Листове штампування як технологічний процес також зазнає впливу цих швидких змін. Ці зміни включають, але не обмежуються, підвищенням продуктивності виробництва, збільшенням швидкості виготовлення готової продукції, зменшенням технологічних труднощів між налаштуванням обладнання та штампом, а також скороченням часу, необхідного для встановлення штампа. Ці покращення будуть забезпечені інтелектуальною пресою системою, що складається з чотирьох основних елементів: управління, ідентифікація, прогнозування та моніторинг [2]. Деформація уздовж прямої лінії або траєкторії є одним із найпоширеніших типів процесів у листовому штампуванні. Згинання металевих листів може здійснюватися у різних процесах, таких як витягування, згинання за допомогою спеціалізованих машин, згинання металу у штампі.

Операція згинання — це операція листового штампування, яка передбачає пластичну

деформацію матеріалів, особливо металів, навколо лінійної вісі, відомої як вісь згинання [5]. Простими словами, згинання відбувається, коли частина деталі деформується вздовж лінійної вісі до досягнення бажаного згину. Процес згинання відбувається не лише по прямій лінії або лінійній вісі, а й уздовж кривих ліній і траєкторій. Важливо відзначити особливості металу під час операцій згинання. Варто зазначити, що під час операції згинання металевий лист не розривається, а лише змінюється контур заготовки до отримання необхідної форми. Фланці зі стискуванням показують, що метал листа стискався або здавлювався під час процесу формування металу, а фланці з розтягуванням означають, що метал розтягувався і, відповідно, стоншувався під час процесу формування. Для того щоб металевий лист вважався підданим процесу згинання, площа поперечного перерізу зігнутого металевого листа повинна мати таку ж товщину, як і решта листа, з якого його виготовлено [6].

Два важливих чинники суттєво впливають на згинання листового металу. Це радіус вигину та розмір кута вигину. При великому куті вигину багато матеріалів можна зігнути до цієї міри без значних ускладнень, оскільки різниця між плоским матеріалом та вже сформованим незначна. Радіус вигину суттєво впливає на бажані результати згинання. Розмір вигину залежить від товщини матеріалу та його твердості. Найменший радіус, що досягається при згинанні, можна виразити рівнянням [7].

Різні типи виробничих процесів можуть виконувати різні операції згинання. Існують підтримувані та непідтримувані операції згинання. Непідтримуване згинання можна описати як процес, у якому листовий метал розтягується в утримуваній матриці. V-подібна та U-подібна матриці можна вважати непідтримуваним згинанням на початкових етапах [7].

Складні геометричні форми допомогли людству економити простір і забезпечили можливість проектувати конструкції, які можна спостерігати в автомобілях, кораблях, літаках та багатьох інших застосуваннях.

Одна з цих форм — це вигин, і багато конструкцій мають вигнуту геометрію у своєму дизайні. Ця конструктивна форма може заощаджувати простір і надавати красивий вигляд, але також може робити конструкції з матеріалу слабшими, ніж їхня початкова структура [8]. Матеріал може тріскатись, втомлюватись або прогинатись залежно від природи використаного матеріалу. Вигин матеріалу може підвищити його економічну цінність і заощадити простір для специфічних застосувань, які цього потребують. Цей процес використовується для виготовлення конструкцій, таких як фланці, зчеплення та балки для будівництва веж і застосування його безмежні, але вони підвищують економічну цінність початкових заготовок, оскільки вони формуються відповідно до вимог застосування [9].

Заготовка пластично деформується у межах області пластичної деформації на графіку напруження–деформації матеріалу, з якого вона виготовлена. Зменшення радіуса заготовки обмежене пластичністю матеріалу; зазвичай матеріали, які характеризуються високою пластичністю, мають високий радіус кривизни, і навпаки. Одним із найважливіших параметрів згинання у проектуванні є допуск на згин, який моделює точку руйнування на радіусі, де заготовка може почати тріскатись під час згинання і для запобігання цьому у [10, 11] застосовується принцип допуску на згин.

Процес згинання розширився на багато секторів у інженерних галузях і продовжує розвиватися з появою нових технік та методів, що забезпечують кращий економічний ефект завдяки якості, але також без шкоди для інженерної цілісності заготовок, що згинаються. У промисловості існує багато процесів згинання, але в роботі [12] розглянуті лише деякі з них — лінійне згинання штампом та ротаційне згинання штампом. Лінійне згинання штампом є традиційним і простим - на пуансон поступово прикладається сила і він поступово згинає заготовку з постійною швидкістю для отримання бажаного виробу. Ротаційне згинання штампом включає обертальний рух і використовується спеціально виготовлений штамп для процесу згинання. Заготовка розташовується в нижньому штампі, а верхні штампи містять важіль, який контактуючи із заготовкою, згинає її потрібним чином для отримання бажаної форми.

Основні процедури для дослідження операцій згинання листового металу наведені в [5]

і вони включають аналіз процесу, симулятивну процедуру, вимірювання, контроль та тестування. У [13] розроблено ряд стратегій моделювання процесу згинання металу. Моделювання може служити для визначення як важливих параметрів процесу, так і відповідних моментів для виконання коригувальних дій. Потім, на основі цих моделей моделювання, структуруються та досліджуються основні коригувальні процедури. Це дозволяє значно зменшити доходи та трудомісткі випробування на дослідних установках.

Випробувальні установки були структуровані та побудовані у роботі [14] і це робить можливим дослідження проведення процесу за розумних умов, користуючись лабораторною установкою. Вимірювальні пристрої можуть бути випробувані та вдосконалені, при цьому використовується розроблена та впроваджена система керування у сучасній системі управління [15].

Згинання металу є величезною індустрією, особливо для масового виробництва, наприклад, у автомобільній промисловості, де панелі кузова виробляються з листового металу [17]. З розглянутих досліджень можна зробити висновок, що основні типи згинання включають також отримання U-подібних деталей. Інші процеси, які слід враховувати при операціях згинання, включають ребріння, фланцювання та згинання труб [18,19].

У цій роботі далі буде досліджено операція згинання U-подібної деталі, яка може використовуватися для великих складних проектів.

Основною метою дослідження є визначення напружено-деформованого стану при виконанні операції листового штампування згинання при зміні радіусів згинання шляхом комп'ютерного моделювання.

Для досягнення поставленої мети було виконане комп'ютерне моделювання в ліцензованому програмному комплексі QFORM [20], який є на кафедрі комп'ютерного моделювання та інтегрованих технологій обробки тиском Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» завдяки співпраці з міжнародною компанією «Micas Simulations Ltd.» (Оксфорд, Великобританія).

В результаті підготовки до моделювання процесу виготовлення деталі було розроблено необхідний інструмент та заготовку в програмному забезпеченні SolidWorks, яке використовується як для створення моделей, так і для конструкторської документації.

Було створено заготовку та інструмент, що складається з нижньої та верхньої частини штампу (рис. 1).

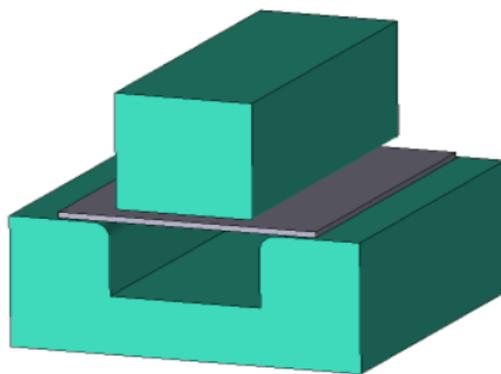


Рис. 1. Побудовані моделі інструменту та заготовки для моделювання

Верхній штамп має закруглення 1 мм, в той час як радіус закруглення нижнього штампу було зроблено в трьох варіантах (2, 3 та 5 мм) для дослідження та подальшого вибору раціональної конфігурації.

Створені деталі було імпортовано в програмне забезпечення QForm для подальшого моделювання.

Було обрано матеріал для інструменту (5ХНМ) та для заготовки (Ст25), відповідну температуру початку штампування (20°C). Також було обрано налаштування для притиску та

пресу з відповідним розрахунку навантаженням (6,3 МН). Умовою зупинки було виставлено відстань між інструментами, яка дорівнює 2 мм, тобто товщині заготовки.

Під час виконання моделювання за трьома варіантами згинання листового матеріалу, які відрізняються радіусом закруглення нижнього штампу (2, 3 та 5 мм) було отримано результати за такими параметрами: інтенсивність напружень (рис. 2), опір деформації (рис. 3), пластична деформація (рис. 4), швидкість деформації (рис. 5), вектор швидкості (рис. 6).

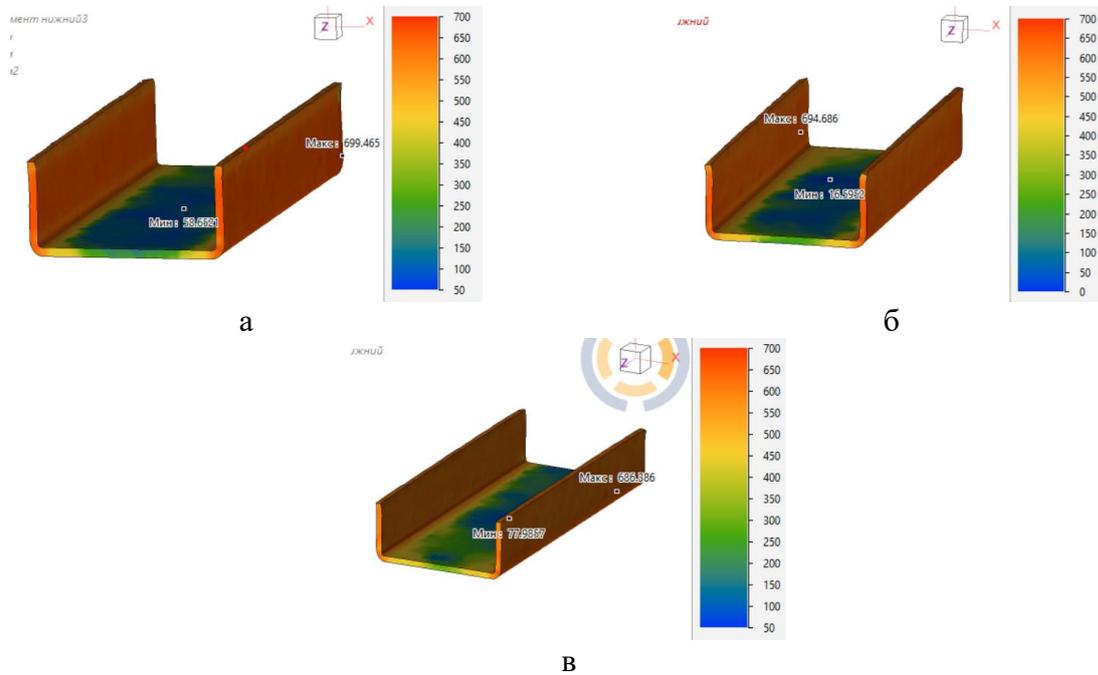


Рис. 2. Значення інтенсивності напружень (МПа) для радіусу закруглення у нижньому штампі 2 мм (а) 3 мм (б) та 5 мм (в)

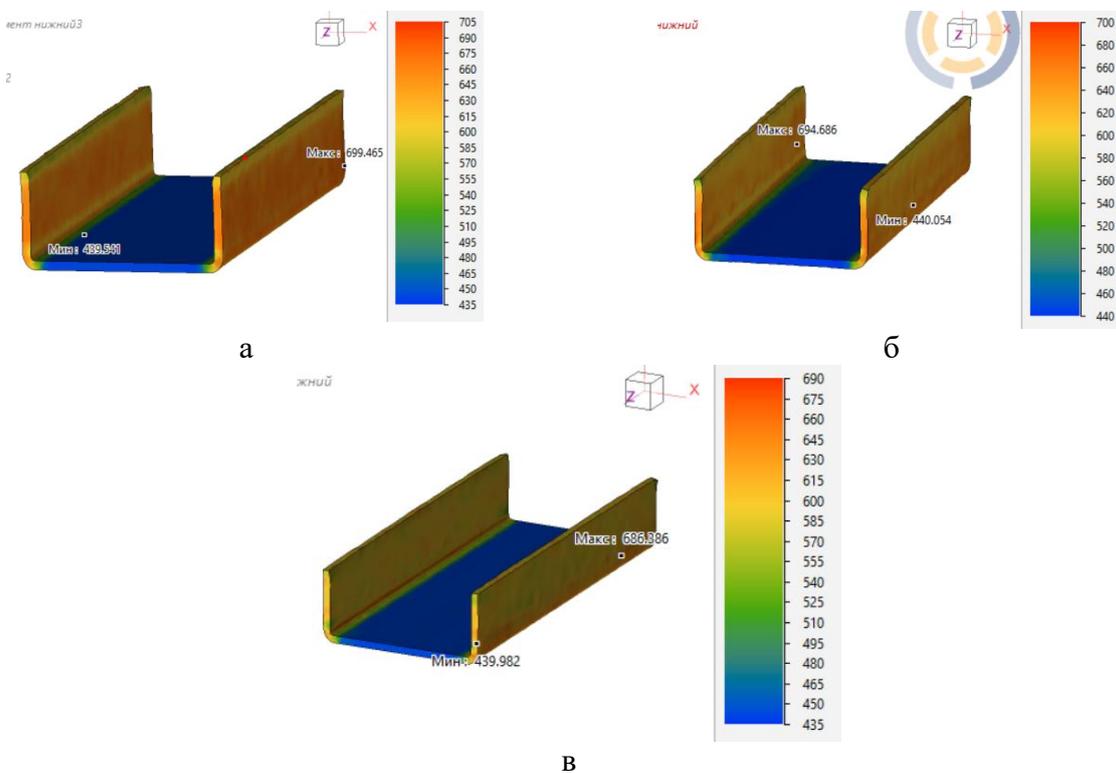


Рис. 3. Значення опору деформації (МПа) для радіусу закруглення у нижньому штампі 2 мм (а) 3 мм (б) та 5 мм (в)

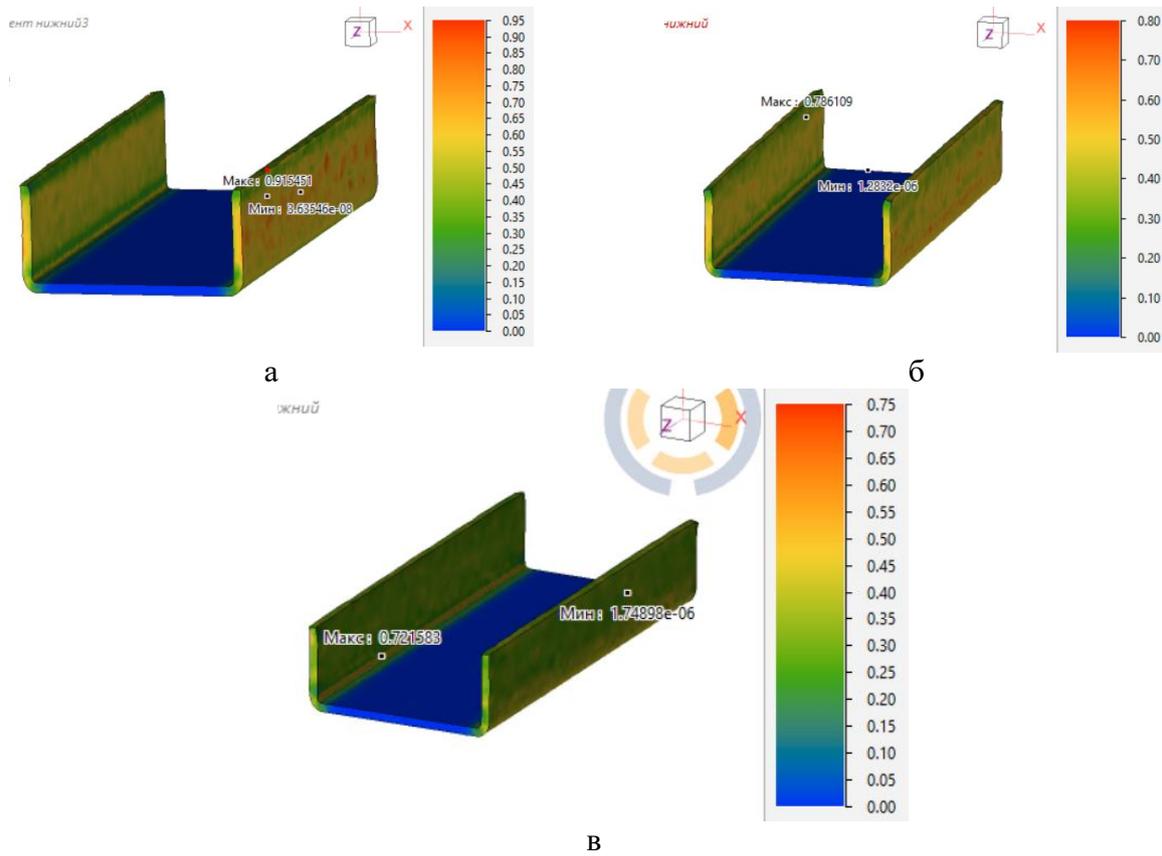


Рис. 4. Величина пластичної деформації для радіусу закруглення у нижньому штампі 2 мм (а) 3 мм (б) та 5 мм (в)

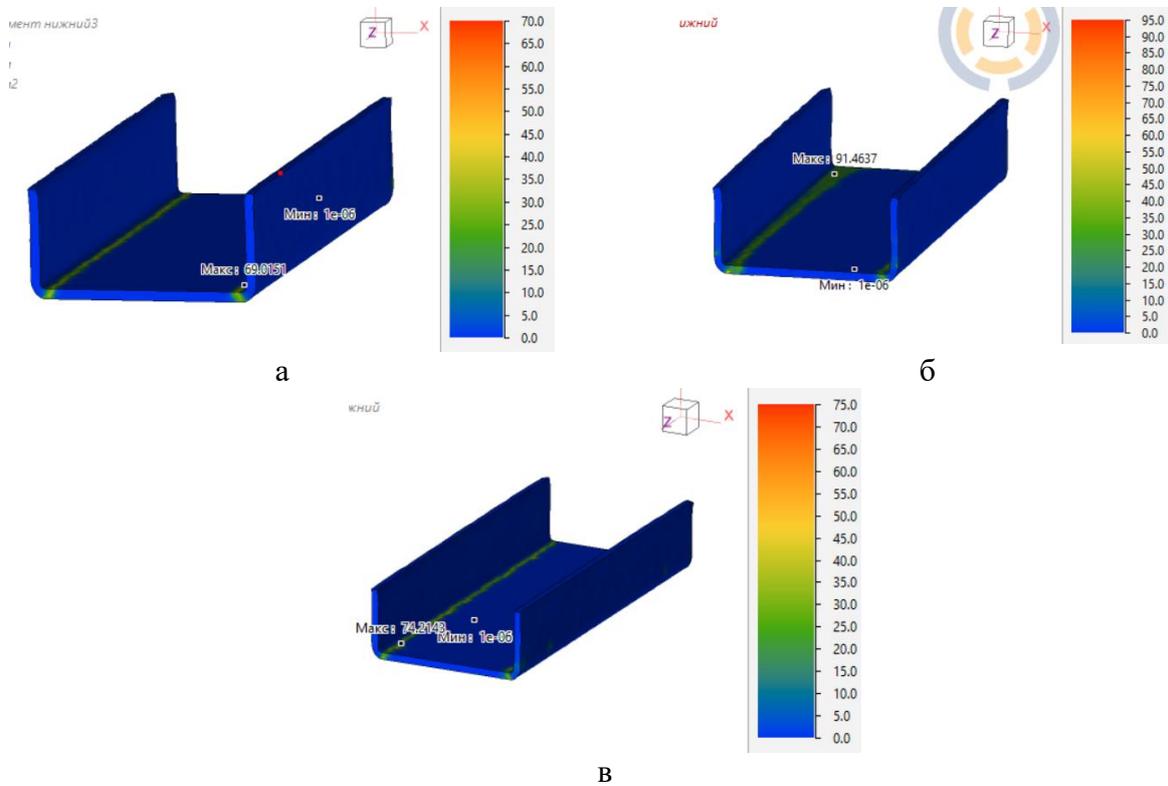


Рис. 5. Значення швидкості деформації (1/с) для радіусі закруглення у нижньому штампі 2 мм (а) 3 мм (б) та 5 мм (в)

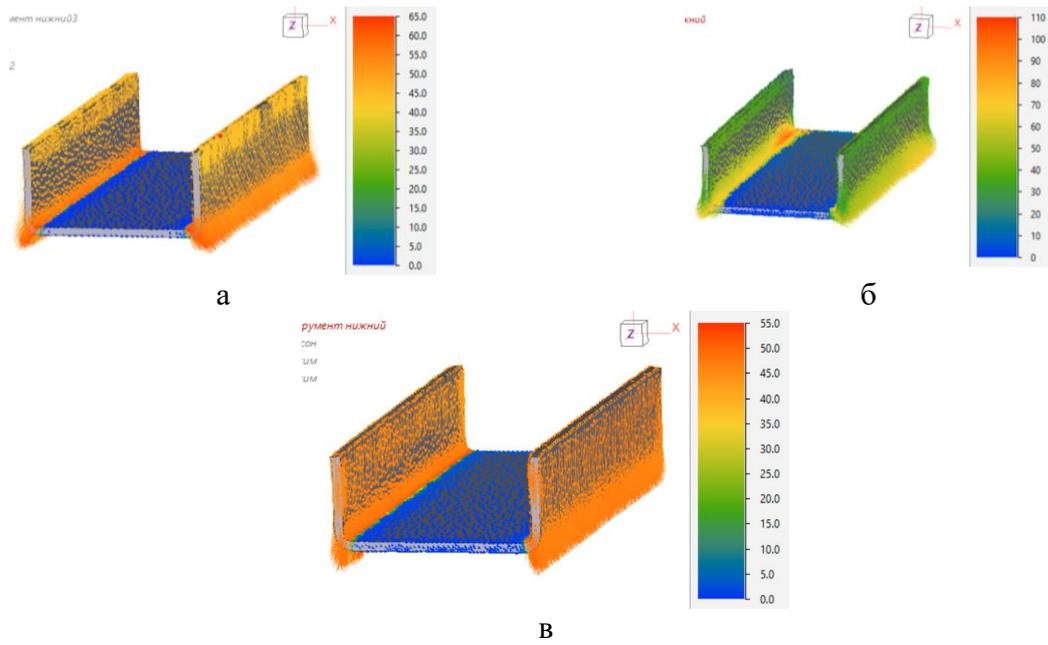


Рис. 6. Напряг та величина вектора швидкості (мм/с) для радіусу закруглення у нижньому штампі 2 мм (а) 3 мм (б) та 5 мм (в)

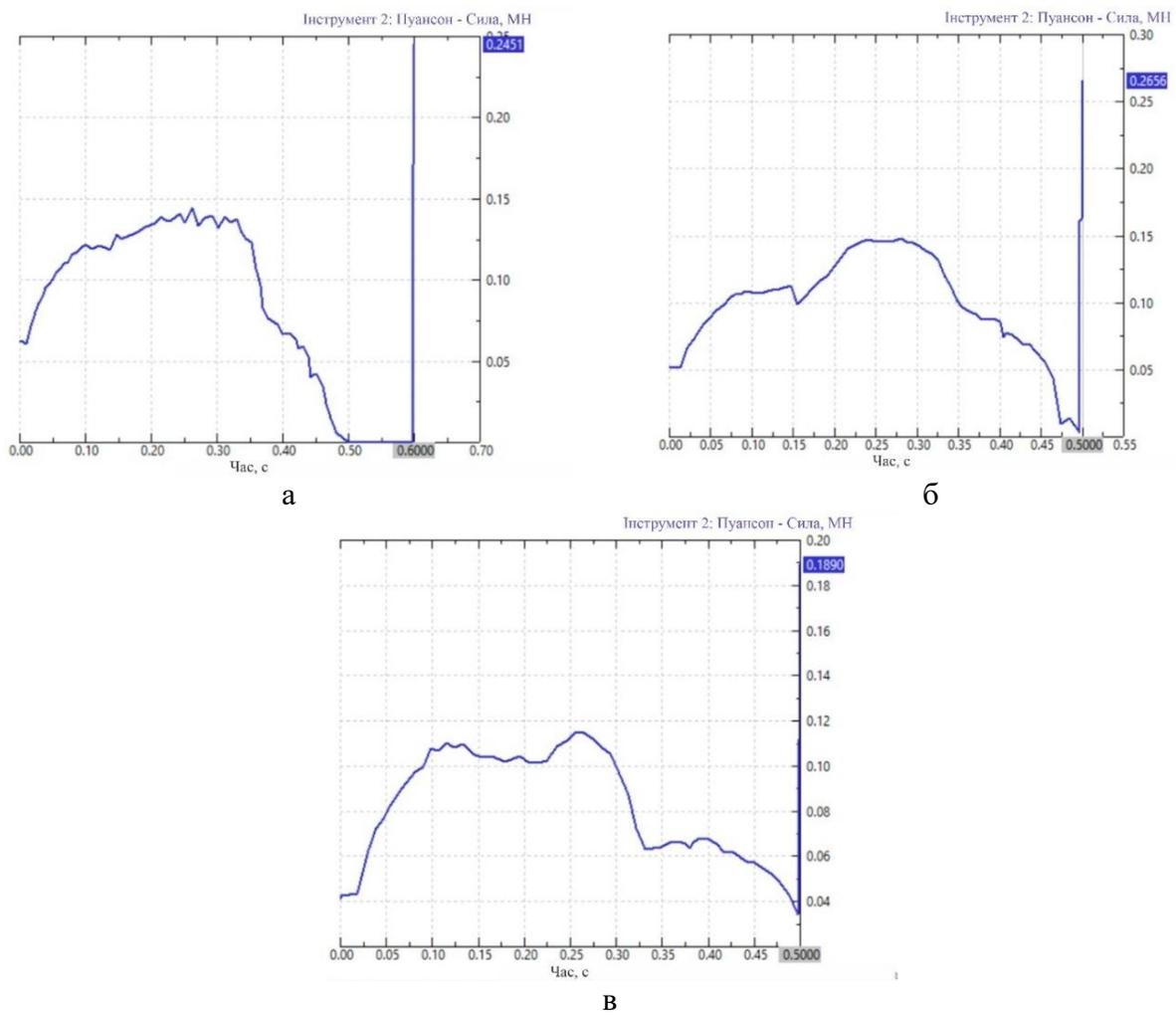


Рис. 7. Зміна силового навантаження (МН) при згинанні з радіусом 2 мм (а) 3 мм (б) та 5 мм (в)

ВИСНОВКИ

Результатом виконаного дослідження є отримання розподілу показників напружено-деформованого стану заготовки при листовому штампуванні U-подібної деталі зі змінним радіусом згинання. При цьому в якості показників напружено-деформованого стану було обрано розподіл показників інтенсивності напружень, опору деформації, швидкості деформації та величини пластичної деформації. Також для можливості оцінки ефективності самого процесу згинання також було визначено силове навантаження під час всього процесу згинання при різних схемах деформування.

Проаналізувавши отримані результати моделювання було виявлено, що збільшення радіуса згинання призводить до наступних результатів: зменшення показників інтенсивності напружень та опору деформації має приблизно однакову величину і складає біля 7 %, а значення пластичної деформації знижуються на 24 %, але саме суттєво при цьому є зниження силового навантаження на 21 %.

Результати моделювання процесу листового штампування при згинанні показали бездефектність виготовлення деталі за вибраними параметрами і перевагу обрання варіанту нижнього штампу з радіусом 5 мм, що підтверджено зниженням показань сили, що потрібна для штампування, а також напружень та пластичної деформації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Tisza M. (2013) Recent development trends in sheet metal forming. *Int J Microstruct Mater Propert* 8(1/2):Pp.125–500.
2. Groover M. (2013) *Principles of modern manufacturing*, 5th edn. Wiley publisher.
3. Wanisevic A., Milutinovi M., Strbac B., Skakum P. (2013) Stress state and spring back in V-bending operations. *J Technol Plast* 39(2):Pp.157–168.
4. Lim Y, Venugopal R, Galip AU (2008) Advances in controls of sheet metal forming. In: *Proceedings of the 17th world congress, the international federation of automatic control Seoul, Korea, July 6–11*, pp.1875–1883. <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.1201>
5. Damerowa U., Tabakajew D., Borzykh M., Schaermann W., Homberg W., Trächtler A. (2014) Concept for a self-correcting sheet metal bending operation. *Procedia Technol* 15:Pp.439–446.
6. Hosford W., Duncan J. (1999) Sheet metal forming: a review. *JOM* Pp.39–44.
7. Groche P., Fitteshe D. (2007) Incremental bulk forming. *Ann CIRP*.
8. Bressan J. (2008) Influence of thickness size in sheet metal forming. *Int J Mater Form suppl 1*:Pp.117–119.
9. Suchy I. (2006) *Handbook of die design*, 2nd edn. McGraw-Hill, New York.
10. Cai S. (2019) Investigations of sheet metal forming by vaporizing metal foils. *Int J Adv Manuf Technol* 102:Pp.3265–3270.
11. Alexandrov S., Hwang Y. (2009) The bending moment and spring-back in pure bending of anisotropic sheets. *Int J Solids Struct* 46:Pp.4361–4368.
12. Tisza M., Lukacs Z., Gal G. (2008) Integrated process simulation and die-design in sheet metal forming. *Int J Mater Form suppl 1*:Pp.185–188.
13. Oyinbo S., Ikumapayi O., Jen T., Ismail S. (2020) Experimental and numerical prediction of extrusion load at different lubricating conditions of aluminium 6063 alloy in backward cup extrusion. *Eng Solid Mech* 8:Pp.119–130.
14. Atzema E., Abspoel M., Kömmelt P., Lambriks M. (2009) Towards robust simulations in sheet metal forming. *Int J Mater Form 2(Suppl 1)*:Pp.351–354.
15. Kirkhorn L., Frogner K., Andersson M., Ståhl J. (2012) Improved tribotesting for sheet metal forming. *Procedia CIRP* 3:Pp.507–512.
16. Dufloy J., Vancza J., Aereus R. (2005) Computer aided process planning for sheet metal bending: a state of the art. *Comput Ind* 56:Pp.747–771.
17. Adeoti O., Dahunsi O., Awopetu O., Oladosu K., Ikumapayi O. (2019) Optimization of clay-bonded graphite crucible using D-optimal design under mixture methodology. *Int J Sci Technol* 8(7):Pp.455–461.
18. Ikumapayi O., Oyinbo S., Bodunde O., Afolalu S, Okokpuje I., Akinlabi E. (2019) The effects of lubricants on temperature distribution of 6063 aluminium alloy during backward cup extrusion process. *J Mater Res Technol* 8(1):Pp.1175–1187.
19. Azeez T., Ikumapayi O., Bodunde O., Babalola S., Ogundayomi M. (2019) Measurement of surface roughness on a transmission shaft using CNC and conventional lathes machining. *Int J Sci Technol* 8(10):Pp.1626–1633.
20. QForm UK. (2025). <https://www.qform3d.com/>.

Danylets Y., Tkachov V., Chukhlib V., Tymofieiev V., Khodyriev H. Study of the stress-strain state during sheet stamping of a U-shaped part with a variable bending radius.

The article analyses publications on sheet metal bending operations for the manufacture of various parts for different industries, especially in the modern world. In compiling the literature review, the main focus is on the types of bending operations and their application for obtaining U-shaped parts. At the same time, attention is paid to the main parameters of shape change during bending, namely the bending radius of sheet material. As a result, computer modelling of the bending operation with a variable radius on the lower die was selected for the study. The main result of the work is to determine the influence of the bending radius on the change in stress intensity, deformation resistance, plastic deformation, deformation rate and force load of the bending process when obtaining a U-shaped part during sheet metal stamping.

It was found that increasing the bending radius leads to the following results: the decrease in the stress intensity and deformation resistance indicators is approximately the same and is about 7%, and the plastic deformation values are reduced by 24%, but the most significant is the reduction in the force load by 21%. The results of modeling the sheet metal stamping process during bending showed the defect-free manufacturing of the part according to the selected parameters and the advantage of choosing the lower die with a radius of 5 mm, which is confirmed by the decrease in the force required for stamping, as well as stresses and plastic deformation.

Keywords: bending, sheet metal stamping, deformation, stress, operation.

Данилець Юрій Юрійович – магістр НТУ «ХПІ».

Danylets Yurii – master NTU «KhPI».

E-mail: dfjfhggjfbff.com@gmail.com

Ткачов Вячеслав Юрійович – канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПІ».

Tkachov Viacheslav – Candidate of Technical Science, Associate Professor NTU «KhPI».

E-mail: engineer.viacheslav@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4619-5758>.

Чухліб Віталій Леонідович – д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри НТУ «ХПІ».

Chukhlib Vitalii – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department NTU «KhPI»

E-mail: prof dnepro@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6176-0917>.

Тимофєєв Вадим Дмитрович – канд. техн. наук, нач. наук.-досл. лабор. НТУ «ХПІ».

Tymofieiev Vadym – Candidate of Technical Science, Head of the Research Laboratory NTU «KhPI».

Ходирєв Геннадій Павлович – старший викладач НТУ «ХПІ»

Khodyriev Hennadii – Senior Lecturer NTU «KhPI»

E-mail: khodirevgennadiy@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6347-1286> .

НТУ «ХПІ» – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків.

NTU «KhPI» - National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv.

Стаття надійшла до редакції 10.10.25 р.