

# Повторюваність результатів багатопрохідного лазерного формування листових матеріалів

О.Д. Кагляк<sup>1</sup> • О.В. Прохоренко<sup>1</sup> • Б.С. Романов<sup>1</sup> • О.О. Гончарук<sup>1</sup> •  
О.В. Сіора<sup>2</sup> • О.О. Мельник<sup>1</sup> • Л.Ф. Головка<sup>1</sup>

Received: 13 April 2021/ Accepted: 24 May 2021

**Анотація.** Лазерне формоутворення листових матеріалів є перспективним процесом обробки, оскільки не потребує високо-вартісного, металоємного штампового обладнання, є процесом гнучким та дозволяє проводити обробку, в тому числі, пружних крихких матеріалів та матеріалів з підвищеною жорсткістю. Тому дослідження особливостей лазерного формоутворення листових матеріалів є важливим. На даний час є необхідність додатково вивчити питання повторюваності результатів обробки під час лазерного формоутворення та дослідити можливості стабілізації параметрів процесу. Власне, на ці питання і спрямоване дане дослідження.

В статті представлені методика та результати експериментальних досліджень повторюваності результатів лазерного формування листових матеріалів при багатопрохідному опроміненні за паралельними та різнонаправленими траєкторіями. Розроблено методичний підхід до використання програмного комплексу VisualWeld для моделювання процесу багатопрохідного лазерного формоутворення. З використанням згаданого програмного комплексу, виконано числове моделювання процесу опромінення лазерним променем, за наведеною нижче технологічною схемою, як альтернатива фізичному експерименту, для прогнозування деформацій зразків та визначення параметрів налаштування. Експериментально встановлено, що повторюваність результатів формування при лазерному формоутворенні достатньо висока, розбіжність у величині деформації переважно не перевищувала 5%. Крім того, показано, що варіюючи напрямком траєкторій опромінення, їх кроком та кількістю проходів на кожній траєкторії, можна отримувати складну просторову конфігурацію виробу.

**Ключові слова:** лазерне формоутворення, залишкові напруження, лазерне опромінення, листовий матеріал.

## Вступ

Лазерне формоутворення викликає зацікавленість дослідників, оскільки володіє рядом переваг. Зокрема, лазерне формоутворення є безконтактним [1] гнучким процесом, що легко переналаштовується, не потребує важкого металоємного обладнання та інструменту, дозволяє формувати жорсткі, пружні та крихкі матеріали. Серед теплових способів формування лазерне формоутворення вигідно виділяється тим, що лазерний промінь, як теплове джерело є стійким, стабільним, дозованим та може чітко позиціонуватися.

Лазерне формоутворення може здійснюватися при одиничному або багаторазовому опроміненні. При

багаторазовому опроміненні, траєкторії одиничних проходів можуть співпадати, розташовуватися паралельно, або за якимось законом одна відносно одної, чи за комбінації цих варіантів. Загалом, повторюваність результатів обробки при лазерному формуванні є достатньо високою, однак, за умов багаторазового опромінення, особливо при неспівпадінні траєкторій, тепловий фронт від попередньої обробленої зони може впливати на результати формування, змінюючи вихідні умови. Тому є необхідність додаткового вивчення повторюваності результатів обробки за таких умов.

Відомо, що найпродуктивнішим механізмом формування являється механізм градієнту температур [2]. Тому в дослідженні було обрано режими обробки, що дозволяли відтворювати цей механізм формування. Під час дії механізму градієнту температур, на фазі нагрівання, внаслідок неможливості вільної реалізації температурних деформацій, формується поле пружних деформацій, які досягнувши рівня границі текучості матеріалу далі вже не збільшуються, а надлишок

✉ O. D. Kaglyak  
Kaglyak\_o@meta.ua

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

<sup>2</sup> Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ, Україна

температури спричиняє появу і розвиток пластичних деформацій, які, в свою чергу, визначають перерозподіл локальних об'ємів металу в області нагріву, а їх нерівномірний розподіл в поперечному перерізі призводить до формування поля тимчасових, а потім і залишкових напружень 1 роду, зрівноважених в об'ємах всієї конструкції. Перерозподіл локальних об'ємів зручно охарактеризувати величинами локальних переміщень точок зразка відносно обраної системи координат.

Для полегшення прогнозування величини переміщень та зменшення кількості фізичних експериментів, доцільно використовувати числове моделювання. Готові, спеціалізовані для моделювання лазерного формоутворення листових матеріалів, програмні пакети на ринку відсутні. Тому, було прийняте рішення дослідити можливість використання, для моделювання лазерного формоутворення, програмного комплексу VisualWeld, який призначений для моделювання зварювальних процесів. При цьому, слід врахувати, лазерне формоутворення проводиться без наявності рідкої фази, тобто температура матеріалу в процесі обробки не перевищує температуру плавлення і формоутворення відбувається в твердому стані.

Аналіз факторів [3] процесу лазерного формоутворення показує, що найбільш впливовими є: потужність лазерного випромінювання, швидкість переміщення лазерного променя, розмір зони фокусування, товщина оброблюваного зразка та властивості оброблюваного матеріалу.

Властивості оброблюваного матеріалу є вихідними умовами, тому змінювати їх ми можемо лише до початку формування, наприклад, термічною, механічною чи іншими видами обробки. Товщину оброблюваного зразка також можна віднести до вихідних умов. Однак, слід врахувати, що взаємне співвідношення товщини зразка з діаметром променя створює умови для дії того чи іншого механізму формування. [2, 4]

Найбільш зручними параметрами для керування є потужність лазерного променя, швидкість його переміщення та розмір зони його фокусування. Варіативність цих параметрів і забезпечила вихідні дані для числового моделювання, яке служило альтернативою фізичному експерименту для прогнозування величини переміщень зразків та визначення параметрів налаштування устаткування для досягнення заданого значення величини вигину зразка з площини.

### Методика проведення експериментальних досліджень

Визначення повторюваності результатів формування при багатократному циклічному опроміненні, проводилися на зразках з нержавіючої сталі аустенітного класу 12X18H9T розміром 200×50 мм. завтовшки 0,5 мм. Вибір даної сталі обумовлений тим,

щоб уникнути впливу на результати формування механізму поліморфних перетворень та, загалом, структурних змін в оброблюваному матеріалі, які можуть суттєво впливати на результати формування [8, 9]. Обробка проводилася циклами по три проходи, після трьох проходів відбувався перехід на нову ділянку і цикл повторювався. Опромінення проводилося в одному напрямку, для виходу на початкову точку здійснювалося переміщення без опромінення.

Обробка проводилася за схемами представлені на рис. 1, а–д. При цьому режим обробки був наступним: лазерний промінь лазера на ІАГ довжиною хвилі 1,06 мкм, потужність променя 350 Вт, швидкість переміщення променя 5 м/хв, діаметр зони фокусування 4 мм, кількість проходів на кожній траєкторії.

Вимірювання величини кута згинання на кожній траєкторії проводилося за допомогою інструментального кутоміра, який дозволяє вимірювати з точністю до двох хвилин.

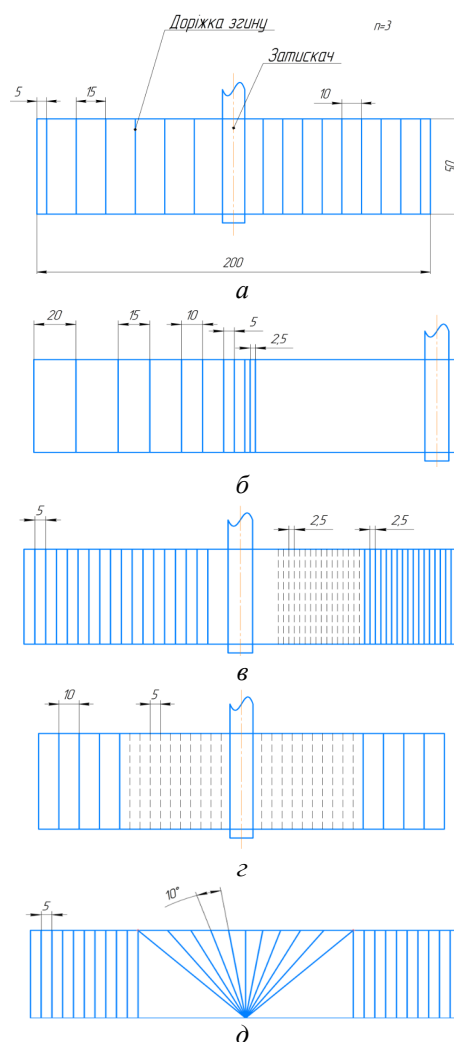


Рис. 1. Схеми обробки зразків з нержавіючої сталі 12X18H10T

### Методика числового моделювання

Для моделювання процесу нагрівання листових матеріалів лазерним променем застосована об'ємна модель кінчного джерела нагрівання (рис. 2), згідно якої інтенсивність випромінювання лазера  $Q(x, y, z)$  визначається нормальним розподілом за Гаусом

$$Q(x, y, z) = Q_0 \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{r_0^2(z)}\right)$$

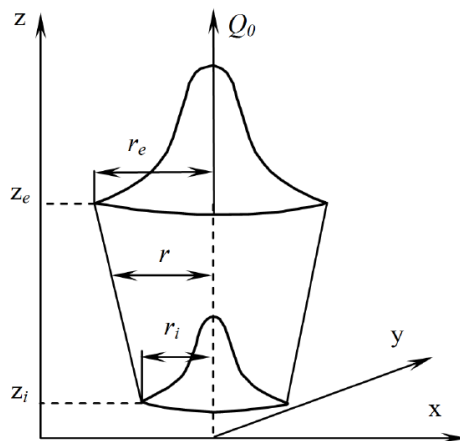


Рис. 2. Об'ємна модель кінчного джерела нагрівання лазерним променем

і залежить від зміни радіусу  $r_0(z)$  лазерного променя вздовж глибини

$$r_0(z) = r_e + \frac{r_i - r_e}{z_i - z_e} \cdot (z - z_e)$$

де  $Q_0$  – густина теплового потоку,  $r_e$  – радіус променя на поверхні пластини;  $r_i$  – радіус променя в глибині пластини;  $z_e$  – відстань від початку системи координат до поверхні пластини;  $z_i$  – відстань від по-

чатку системи координат до глибини прогріву;  $y$  – координата вздовж напрямку руху джерела нагрівання;  $x$  – координата в поперечному напрямку руху джерела нагрівання.

Моделювання процесу нагрівання виконували програмному комплексу VisualWeld. Значення параметрів режиму нагрівання і геометричних параметрів кінчного джерела нагрівання під час лазерного опромінення зразків наведені в таблицях 1 та 2.

Розв'язок нестационарної задачі термо-пружно-пластичності від впливу лазерного опромінення отриманий методом скінченних елементів для розроблених тривимірних твердотільних скінченно-елементних моделей двох пластин розмірами  $100 \times 50 \times 0,5$  мм і однієї  $200 \times 50 \times 0,5$  мм з різним кроком між траєкторіями нагрівання, як показано на рис. 1, а, б. Матеріал пластин – сталь 12Х18Н9Т. В процесі числового моделювання враховувалась зміна теплофізичних і механічних властивостей матеріалу з підвищенням температури нагріву.

Розмір вічка сітки в області траєкторії нагрівання становить  $0,25 \times 0,25$  мм з поступовим збільшенням до  $1 \times 1$  мм (рис. 3, а), по товщині сітка розбита на два шари завтовшки  $0,25$  мм. Моделювання затискача пластини під час лазерного опромінення виконано шляхом жорсткого закріплення вибраних вузлів на поверхні скінченно-елементної моделі, як показано на рис. 3, б.

Розрахунок температурних полів при моделюванні процесу опромінення показує, що максимальна температура у модельних зразках під час виконання трьох послідовних нагрівів кожної траєкторії не перевищує температури плавлення матеріалу пластин ( $1300$  °С) і становить після 1-го проходу  $992$  °С, після 2-го –  $1033$  °С, після 3-го –  $1048$  °С.

### Результати експерименту та числового моделювання

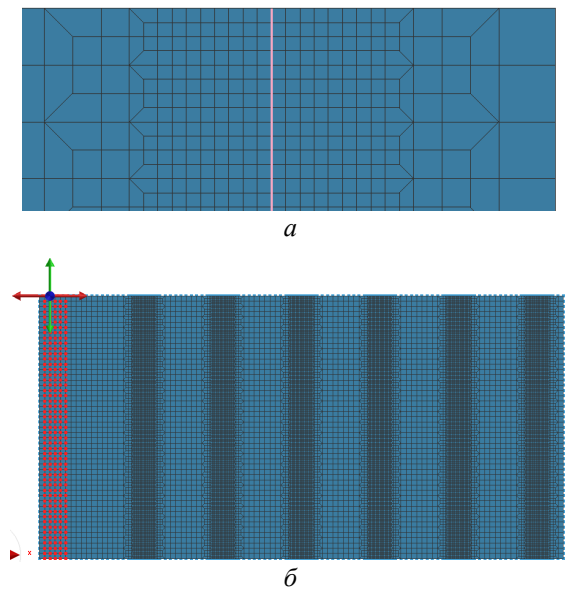
В результаті розв'язку нелінійної задачі термо-пружно-пластичності для трьох модельних зразків визначено розподіл температур та переміщення за

Таблиця 1. Параметри режиму нагрівання

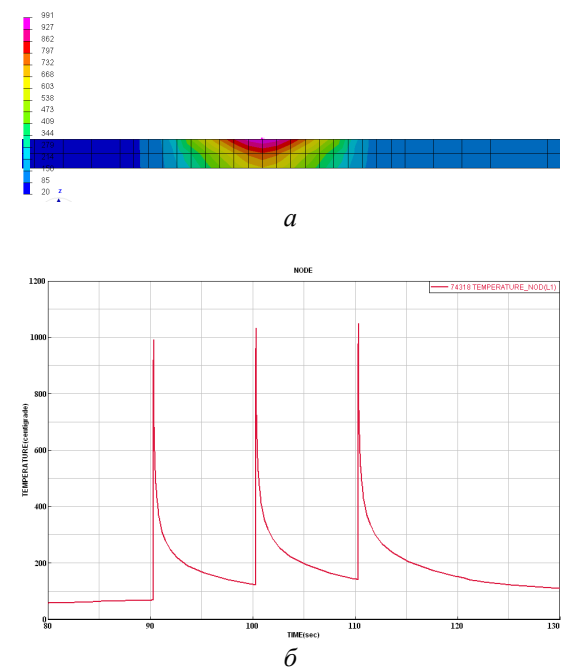
Діаметр зони фокусування, мм	Швидкість нагрівання, мм/сек	Час нагрівання, сек	Погонна енергія нагрівання, Дж/мм	Кількість проходів кожної траєкторії	Час між проходками, сек
4	83,3	0,595	4,2	3	10

Таблиця 2. Геометричні параметри джерела нагрівання у VisualWeld

Діаметр джерела нагрівання, мм		Глибина проникнення, мм
на поверхні	в глибині	
4	0,5	0,25



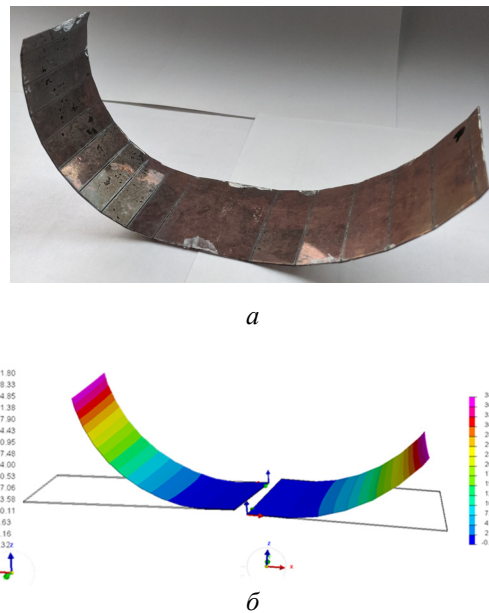
**Рис. 3.** Скінченно-елементна модель пластини: згущення сітки в області нагрівання (а); граничні умови закріплення під час нагріву і охолодження (б)



**Рис. 4.** Розподіл температур у поперечному перерізі траєкторії нагріву: після 1-го проходу (а); за повний цикл опромінення (б)

координатами вздовж осей Z та X, на основі яких обчислені кути згинання (табл. 3–5) для кожної траєкторії нагрівання.

У випадку обробки зразка з однієї сторони з кроком між сусідніми траєкторіями 15 мм, а з іншої 10 мм (рис. 5, а), були отримані різні значення результуючої кривини поверхні, що відтворює і числовий експеримент (рис. 5, б). При цьому, кут згинання на кожній окремій ділянці був співрозмірний та близький за величиною. Зокрема, для ділянки опроміненої з кроком 15 мм результати експерименту і моделювання представлені в табл. 3.



**Рис. 5.** Форма зразка при опроміненні з кроком 15 мм (права сторона) та 10 мм (ліва сторона): експеримент (а), моделювання (б)

В даному випадку, відхилення експериментальних даних від середнього значення величини кута згинання на кожній траєкторії не перевищувало 1.61 %, що є доволі гарним результатом.

Відмінність між середніми значеннями результатів числового моделювання і експерименту становило близько 1 градуса, що становить 10 % розбіжності для даного зразка.

Для кроку 10 мм, величини кутів згинання дещо відрізнялися, як і величина відхилення (табл. 4). Різниця у величині кутів згинання на окремій траєкторії, порівняно з попереднім випадком пояснюється похибкою установки, в результаті якої були дещо змінені умови опромінення, зокрема, розмір зони фокусування променю. Однак, величина кутів згинання на кожній ділянці повторювалася досить добре, і якщо виключити значення на 7-ій доріжці (яке могло бути викликане впливом несистемного фактора), то розбіжність

Таблиця 3. Результати формування з кроком 15 мм

№ доріжки	Крок, мм	Кут, град		Відхилення від середнього, %	
		експеримент	моделювання	експеримент	розрахунок
1	15	10.33	8.31	0.00	10.87
2	15	10.33	10.18	0.00	-9.19
3	15	10.50	10.12	-1.61	-8.54
4	15	10.50	9.45	-1.61	-1.36
5	15	10.17	8.90	1.61	4.54
6	15	10.17	8.98	1.61	3.68
Середнєзначення		<b>10.33</b>	<b>9.32</b>		

Таблиця 4. Результати формування з кроком 10 мм

№ доріжки	Крок, мм	Кут, град		Відхилення від середнього, %	
		експеримент	моделювання	експеримент	розрахунок
1	10	12.33	8.35	2.12	2.74
2	10	12.00	9.26	<b>4.76</b>	<b>-7.86</b>
3	10	12.63	8.87	-0.26	-3.31
4	10	12.83	8.67	-1.85	-0.98
5	10	12.67	8.56	-0.53	0.30
6	10	12.73	8.63	-1.06	-0.52
7	10	13.67	8.47	<b>-8.47</b>	1.35
8	10	12.43	8.26	1.32	3.79
9	10	12.10	8.20	3.97	<b>4.49</b>
Середнєзначення		<b>12.60</b>	<b>8.59</b>		

Таблиця 5. Результати формування з варіативним кроком 20, 15, 10, 5 мм (попарно починаючи від краю до середини)

№ доріжки	Крок, мм	Кут, град		Відхилення від середнього, %	
		експеримент	моделювання	експеримент	моделювання
1	20	11.50	9.29	-3.82	-1.12
2	20	11.17	9.41	-0.81	-2.43
3	15	11.10	9.27	-0.21	-0.90
4	15	11.00	9.32	0.69	-1.45
5	10	11.00	9.14	0.69	0.51
6	10	11.00	9.03	0.69	1.71
7	5	11.00	8.66	0.69	<b>5.74</b>
8	5	11.00	8.97	0.69	2.36
9	2.5	11.00	9.98	0.69	<b>-8.63</b>
10	2.5	11.00	8.8	0.69	4.21
Середнєзначення		<b>11.08</b>	<b>9.19</b>		

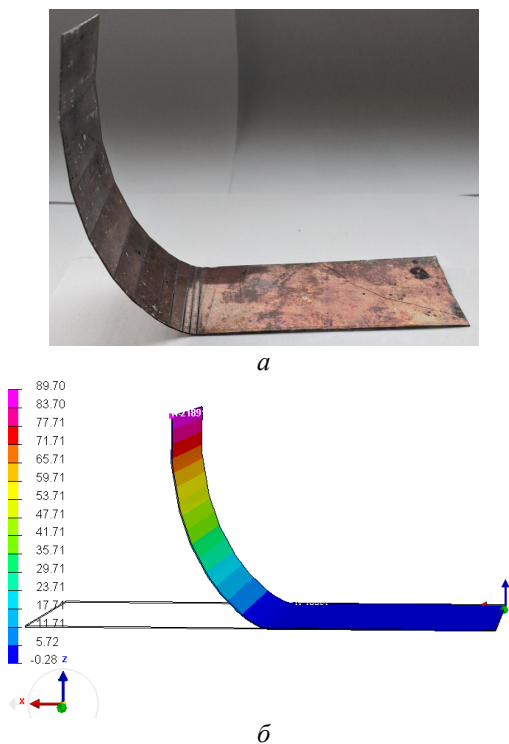
результатів не перевищує 4,76 %. Результати числового моделювання також показують стабільну повторюваність результатів при розбіжності результатів не вище 4,49 % за умови виключення значення кута для 2-ої доріжки.

Як і в попередньому розрахунку значення кутового розрахункового значення на  $\sim 7.86\%$  завдяки впливу накопиченої кількості тепла від 1-ої доріжки, так як 1-а доріжка розташована на відстані лише 5 мм від вільного краю пластини, що і зумовлює підвищення температури порівнянні з доріжками більш віддаленими від вільного краю пластини.

При обробці зразка зі змінним кроком між сусідніми проходами (рис. 6) було отримано подібну картину. Результати вимірювань і моделювання наведені у табл. 5.

В даному випадку найбільше відхилення в експериментальних даних становило 3.82 %, а всі решта менше 1%.

Відхилення результатів числового моделювання при змінному кроці виконання доріжок не перевищує 5,74 % за винятком даних для 9-ої доріжки, для якої відбувається додаткове збільшення об'єму поперечних пластичних деформацій скорочення внаслідок перекриття пластичних зон від 8–10 доріжок, що зумовлено малим кроком (2,5 мм) між ними.



**Рис. 6.** Форма зразка при опроміненні з варіативним кроком 20, 15, 10, 5 мм (попарно починаючи від краю до середини: експеримент (а), моделювання (б))

Очевидно, що величина кроку між сусідніми траєкторіями, поряд з основними параметрами режиму обробки визначає кривину сформованої поверхні. Зокрема при використанні кроку 15 мм, радіус кривини одержаної поверхні становив 95,5 мм, при кроці 10 мм радіус кривини становив 44 мм. (рис. 5). Зменшення кроку між опроміненими доріжками призводить до зменшення радіусу кривини сформованої поверхні, при збереженні всіх інших факторів сталими. Так, за кроку 5 мм, радіус кривини поверхні становив 29 мм, а при кроці 2.5 мм – 13 мм. (рис. 7).



**Рис. 7.** Форма зразка при опроміненні з кроком 5 мм та 2.5 мм

Якщо використовувати не паралельні доріжки, а розташовувати їх під певним кутом одна до одної, то можна одержувати призматичні та конічні форми зразків (рис. 8). При цьому, характер відтворення величини деформації залишиться сталим.



**Рис. 8.** Форма зразка при опроміненні з варіюванням паралельних проходів та зорієнтованих під кутом один до одного

Загалом, варіюючи напрямком траєкторій опромінення, їх кроком та кількістю проходів на кожній траєкторії, можна отримувати складну просторову конфігурацію виробу.

Слід зазначити, що дослідження проводилися на нержавіючій сталі аустенітного класу, яка містить

більше 8% нікелю, а отже температура мартенситного перетворення зміщається в область наднижчих температур. Тому, можна стверджувати, що формування проводилося в аустенітній структурі, яка зберігалася і при нормальній температурі. А отже, зміни форми виробів в результаті старіння чи інших структурних перетворень не повинно спостерігатися, що й було підтверджено повторним обмірюванням зразків через 14 діб після формування. Відмінність, між результатами вимірювання проведеними одразу після обробки та проведеними через 14 діб після неї, коливалася в межах похибки вимірювання. Очевидно, що при обробці вуглецевих сталей, для яких характерне протікання структурно-фазових перетворень під час циклу нагрівання-охолодження, можлива певна зміна форми після завершення обробки. Однак, формування вуглецевих сталей не розглядалося в даній статті, а питання можливої зміни їх форми після завершення обробки, потребує додаткового вивчення.

## Література

- [1] A.N. Thomsen *et al.*, “Online measurement of the surface during laser forming” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 107, No. 3/4, pp. 1569–1579, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-04950-6>
- [2] M. Geiger, “Synergy of Laser Material Processing and Metal Forming”, *CIRP Annals*, Vol. 43, No. 2, pp. 563–570, 1994. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60502-2](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60502-2)
- [3] O.D. Kaghlyak, L.F. Gholovko and O.O. Ghoncharuk, “Lazerne formoutvorennya prostorovykh metalevykh konstrukcij”, *Skhidno-jevropejskij zhurnal peredovykh tekhnologij*, Vol. 42, No. 6/1, pp. 4–11, 2009.
- [4] F. Vollertsen, I. Komel and R. Kals, “The laser bending of steel foils for microparts by the buckling mechanism—a model”, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, No. 3(1), 1995. <https://doi.org/10.1088/0965-0393/3/1/009>
- [5] F. Vollertsen, “Mechanisms and Models for Laser Forming”, *Laser Assisted NetShape Engineering. Proceedings of the LANE'94*, Vol. 1, pp 345–360, 1994.
- [6] J. Magee, K.G. Watkins and W.M. Steen “Edge Effects in Laser Forming”, *Laser Assisted Net Shape Engineering 2, Proceedings of LANE'97*, Meisenbach Bamberg, pp. 399–406, 1997.
- [7] O.D. Kaghlyak *et al.*, “Osoblyvosti lazernogho formoutvorennya lystovykh materialiv”, *Skhidno-jevropejskij zhurnal peredovykh tekhnologij*, No. 2/13(56), pp. 32–40, 2012.
- [8] J. Cheng, Y. Yao, “Microstructure Integrated Modeling of Multiscan Laser Forming”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 124, pp. 379–387, 2002. <https://doi.org/10.1115/1.1459088>
- [9] J. Cheng, Y.L. Yao, “Cooling Effect Multiscan Laser Forming”, *Journal of Manufacturing Process*, Vol. 3(1); pp. 60–72, 2001. [https://doi.org/10.1016/S1526-6125\(01\)70034-5](https://doi.org/10.1016/S1526-6125(01)70034-5)
- [10] F. Vollertsen, “Models for Laser Forming Process”, *Laser Assisted Net Shape Engineering. Proceedings of the LANE'96*. Vol. 1; pp. 324–335, 1996.
- [11] J. Magee, K.G. Watkins and W.M. Steen, “Advance in laser forming”, *Journal of Laser Application*, No. 10, pp. 235–246, 1998. <https://doi.org/10.2351/1.521859>

## Повторяемость результатов многопроходного лазерного формообразования листовых материалов

А.Д. Кагльак, О.В. Прохоренко, Б.С. Романов, А.А. Гончарук, А.В. Сиора, Е.А. Мельник, Л.Ф. Головки

**Аннотация.** Лазерное формообразование листовых материалов, как перспективный процесс обработки, владеет рядом особенностей и преимуществ, поскольку не нуждается в тяжелом металлоемком инструменте и оборудовании. Процесс является гибким, быстроперенастраиваемым и позволяет обрабатывать материалы повышенной жесткости, упругие и хрупкие материалы. Исходя из этого, изучение особенностей лазерного формообразования является актуальной задачей. При изучении лазерного формообразования необходимо обратить дополнительное внимание на вопрос повторяемости результатов обработки и возможности стабилизации параметров процесса.

## Висновки

1. Лазерне формоутворення при комбінації режимів опромінення та взаємного розташування траєкторій опромінення дозволяє отримувати складні прогнозовані конфігурації поверхонь.
2. Повторюваність експериментальних результатів формування при лазерному формоутворенні достатньо висока, розбіжність у величині кутів згинання не перевищувала 5%, а, переважно, була нижчою.
3. Результати числового моделювання лазерного опромінення для прогнозування формоутворення показали незначне відхилення  $\sim 1,01 \dots 1,89$  градусів від експериментальних даних за винятком результатів експерименту, при якому змінились умови фокусування лазерного променя.
4. Програмний комплекс VisualWeld придатний для моделювання багатопрохідного лазерного формоутворення за умови коректного задання параметрів теплового джерела.

*В статье представлены методика и результаты экспериментальных исследований повторяемости результатов лазерного формообразования листовых материалов при многопроходном облучении по параллельным и разнонаправленным траекториям. Разработан методический подход к использованию программного комплекса VisualWeld для моделирования процесса многопроходного лазерного формообразования. При использовании данного программного пакета было проведено численное моделирование процесса облучения лазерным излучением, по представленной в статье схеме, как альтернатива физическому эксперименту для прогнозирования формирования образцов и определения параметров настройки оборудования.*

*Экспериментально установлено, что повторяемость результатов формирования, при лазерном формообразовании, достаточно высока, расходимость величины деформации преимущественно не превышала 5%. Кроме того, показано, что варьируя направлением траекторий облучения, их шагом и количеством проходов на каждой траектории, можно получать сложную пространственную конфигурацию изделия.*

**Ключевые слова:** лазерное формообразование, остаточные напряжения, лазерное облучение, листовый материал.

## Repeatability of multipass laser forming of sheet materials

O.D Kaglyak, O.V. Prokhorenko, B.S. Romanov, O.O Honcharuk, O.V. Siora, O.O. Melnyk, L.F Golovko

**Abstract.** *Laser forming (LF) of sheet material is a progressive treatment process and have some benefits. Laser forming is a flexible process and need no heavy metal-intensive equipment and tools. Materials with high rigidity, brittle, elastic materials can be treated by laser forming. Therefore, the investigation of LF is important task. An important point to study is repeatability of multipass laser forming of sheet materials and explore of the possibilities of stabilizing process parameters. Actually, this research is aimed at these issues.*

*Methods and results of experimental investigation of repeatability of multipass laser forming of sheet materials on parallel and multi-directional passes are described.*

*A methodical approach of using the VisualWeld software package for modeling the process of multi-pass laser forming has been developed. The mentioned software package was used for modeling as an alternative to a physical experiment to predict sample deformations and determine treating parameters. It has been experimentally established that the repeatability in laser forming is quite high, the difference in the amount of deformation preferably did not exceed 5%. In addition, it is shown that by varying the direction of irradiation trajectories, their step and the number of passes on each trajectory, it is possible to obtain a complex spatial configuration of the product.*

**Keywords:** *laser forming, residual stresses, laser treatment, sheet material.*