

## Лазерне формоутворення нержавіючих сталей аустенітного класу та марганцевистих вуглецевих сталей

О. Д. Кагляк<sup>1)</sup>, О. О. Гончарук<sup>2)</sup>, Н. О. Мельник-Кагляк<sup>3)</sup>, М. О. Скляр<sup>4)</sup>

<sup>1), 3)</sup> Національний технічний університет України «КПІ», проспект Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056

<sup>2), 4)</sup> Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАНУ, вул. Автозаводська, 2, Київ, Україна, 04074

### Article info:

Paper received:

17 March 2016

The final version of the paper received:

30 May 2016

Paper accepted online:

04 June 2016

### Correspondent Author's Address:

<sup>2)</sup> natkakaravaeva@ya.ru

Актуальність дослідження лазерного формоутворення полягає в тому, що цей спосіб формоутворення має ряд переваг порівняно зі способами обробки тиском. Зокрема, відсутні зворотний пружний ефект, стоншення матеріалу в зоні обробки, дозволяє формувати крихкі, жорсткі, пружні матеріали, листи значної товщини, не потребує додаткового спеціального обладнання.

Встановлено, що основними параметрами процесу лазерного формоутворення виробів із металевих листів, які визначають продуктивність, якість та вартість обробки, є: потужність лазерного випромінювання, розподіл енергії в перерізі променя, розмір зони фокусування та швидкість її переміщення, кількість теплових джерел і характер їх взаємного розміщення, кількість циклів нагрівання. Визначені області робочих режимів формоутворення листових матеріалів із нержавіючої сталі аустенітного класу 12X18H10T, марганцевистої сталі 65Г. Експериментально встановлено, що силова стійкість лазерноформованих конструкцій як із нержавіючих, так і з вуглецевих сталей вища за стійкість конструкцій, сформованих обробкою тиском; теплова стійкість зразків, сформованих обома способами, – співмірна.

**Ключові слова:** лазерне формоутворення, лазерна поверхнева обробка, термічні напруження, деформація, поліморфні перетворення, крихкі матеріали, матеріали з підвищеною жорсткістю.

## ВСТУП

Серед відомих способів формоутворення листових матеріалів можна виокремити дві групи: це способи, які базуються на обробці тиском, та способи, що ґрунтуються на тепловій дії. До першої відносять згинання та витягування. Теплові способи обумовлені тепловим джерелом, що використовується під час обробки, а саме: нагрівання газовим пальником, зварювальною дугою, індуктивне нагрівання та лазерне нагрівання. Способи обробки тиском мають ряд недоліків порівняно з тепловими: наявність зворотного пружного ефекту, стоншення матеріалу в зоні обробки, неможливість формування крихких матеріалів, складність формування жорстких, пружних матеріалів, листів значної товщини, потреба в спеціальному обладнанні. У свою чергу, формування за допомогою факела газового пальника ускладнене його нестабільністю та слабкою контрольованістю, крім того, зона впливу має значні розміри. Зварювальна дуга також погано контролюється та важко позиціонується, а зона взаємодії поверхні матеріалу з дугою схильна до оплавлення. Використання індукційного нагрівання пов'язане з використанням громіздкого обладнання, причому поверхня матеріалу, як і в попередньому

випадку, схильна до оплавлення. Натомість лазерне випромінювання як теплове джерело стабільне, чітко визначене та добре позиціонується, крім того, процес є гнучким та легко автоматизується, обробку можна проводити на макро-, мікро- та нанорівнях. Тому дослідження процесу лазерного формоутворення є актуальною темою, однак недостатньо вивченою.

Відомий ряд праць, спрямованих на моделювання процесу лазерного формоутворення, серед яких [1–5] стосуються питання градації параметрів процесу. Однак, на нашу думку, є необхідність у ґрунтовнішій систематизації факторів, що впливають на результати лазерного формоутворення.

Загалом дослідники виокремлюють чотири механізми лазерного формоутворення: механізм градієнта температур [2, 3, 6–8]; механізм випинання [2, 4, 5, 8]; механізм зсідання [2, 4]; механізм поліморфних перетворень [9, 10]. Особливу увагу необхідно звернути на механізм поліморфних перетворень, як на найменш досліджений. У працях [9, 10] основна увага приділяється дослідженню змін структури при температурному циклі лазерного формоутворення, однак не дається відповідь на запитання стосовно характеру впливу поліморфних

перетворень на величину формування для конкретних матеріалів. Праці [11–15] мають експериментальне спрямування, але досліджується, здебільшого, формування зразків за прямолінійними траєкторіями, оминаючи формування за криволінійними чи замкненими траєкторіями. Також відсутні узагальнені рекомендації щодо доцільних режимів лазерного формоутворення для конкретних матеріалів. Крім того, потребують вивчення питання стійкості сформованих конструкцій в умовах робочих силових і теплових навантажень та порівняльний аналіз їх стійкості зі стійкістю конструкцій, сформованих обробкою тиском.

Виходячи з вищенаведеного, можна сформулювати мету цієї роботи таким чином: визначення технологічних закономірностей процесу лазерного формоутворення металевих конструкцій складної просторової конфігурації, а також їх експлуатаційних характеристик.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- визначити основні параметри процесу лазерного формоутворення виробів з металевих листів;
- встановити залежність величини деформації від параметрів обробки;
- дослідити вплив поліморфних перетворень на процес формування металів;
- встановити область режимів прогнозованого лазерного формоутворення для нержавіючих сталей аустенітного класу та марганцевистих вуглецевих сталей;
- вивчити стійкість лазерносформованих конструкцій та дослідити можливість виготовлення конструкцій із підвищеною стійкістю до робочих навантажень.

*Аналіз факторів, що впливають на процес лазерного формоутворення*

Для детального вивчення процесу лазерного формоутворення та проведення його математичного моделювання необхідно провести аналіз факторів, що впливають на нього і керують ним.

Загалом кінцева просторова конфігурація виробу, при лазерному формоутворенні, обумовлена величиною, знаком та характером розподілу залишкових деформацій, які виникають в результаті локальної зміни об'єму матеріалу під час повторного циклу нагрівання – охолодження.

Для аналізу процесу лазерного формування фактори та параметри процесу доцільно розділити на три групи (рис. 1).

Перша група характеризує властивості матеріалу, до неї належать:

поглинальна здатність матеріалу, яка визначає частку лазерної енергії, що поглинається матеріалом, спричиняючи його нагрівання; теплофізичні властивості матеріалу, які обумовлюють розподіл теплоти в об'ємі матеріалу зразка; початкова структура матеріалу зразка, що

визначає вихідний напружено-деформований стан зразка та впливає на кінцевий характер і розподіл напружень у зоні обробки; фазовий склад матеріалу, впливає на характер та величину ініційованих напружень та визначає механізм термічного деформування; геометрія зразка, визначає момент інерції зразка, ступінь протидії деформуванню та можливість відведення тепла із зони обробки в холодні шари матеріалу.

До другої групи належать параметри лазерного випромінювання, а саме:

потужність лазерного променя, визначає кількість енергії, що надходить до зразка; діаметр сфокусованого променя, визначає концентрацію лазерної енергії в локальній зоні обробки; розподіл інтенсивності в перерізі лазерного променя, обумовлює розподіл енергетичного вкладу в площині зони обробки; режим опромінення обумовлює характер внесення лазерної енергії в зону обробки. Може використовуватися неперервний або імпульсний режим. Також описує швидкість відносного переміщення лазерного променя та заготовки; час дії, визначає величину енергетичного вкладу в зону обробки за час проходження лазерного променя через одиничну точку заготовки.

До третьої групи відносять фактори, що визначають умови опромінення:

траєкторію руху променя, визначає зону оброблюваного матеріалу, на якій створюються залишкові напруження, та впливає на їх розподіл; кількість проходів, визначає кількість повторних циклів нагрівання та охолодження, підсилення величини деформації після одиничного проходження до потрібного значення; наявність силового примусового деформування, є додатковим параметром для створення напружень потрібного знака та величини. Силоне примусове деформування, у свою чергу, характеризується величиною навантаження, часом дії та розміщенням навантаження відносно зони лазерного нагрівання.

Суккупність та взаємодія зазначених факторів визначають термодформаційну картину в зоні обробки. Під час лазерного формування листового матеріалу, відбувається локальна зміна об'єму матеріалу в зоні обробки. Ця зміна об'єму залежно від параметрів та умов обробки може відбуватися під дією термічного впливу і термічного впливу та структурно-фазових перетворень; термічного впливу та примусового деформування; а також у випадку поєднання дії термічного впливу, структурно-фазових перетворень та примусового деформування. Локальна зміна об'єму викликає появу внутрішніх напружень, що визначаються величиною, знаком і характером розподілу. Утворені напруження релаксують за рахунок залишкової пластичної деформації, яка описується величиною, знаком та характером розподілу. Величина, знак та характер розподілу залишкових деформацій, у свою чергу, визначають кінцеву конфігурацію виробу.

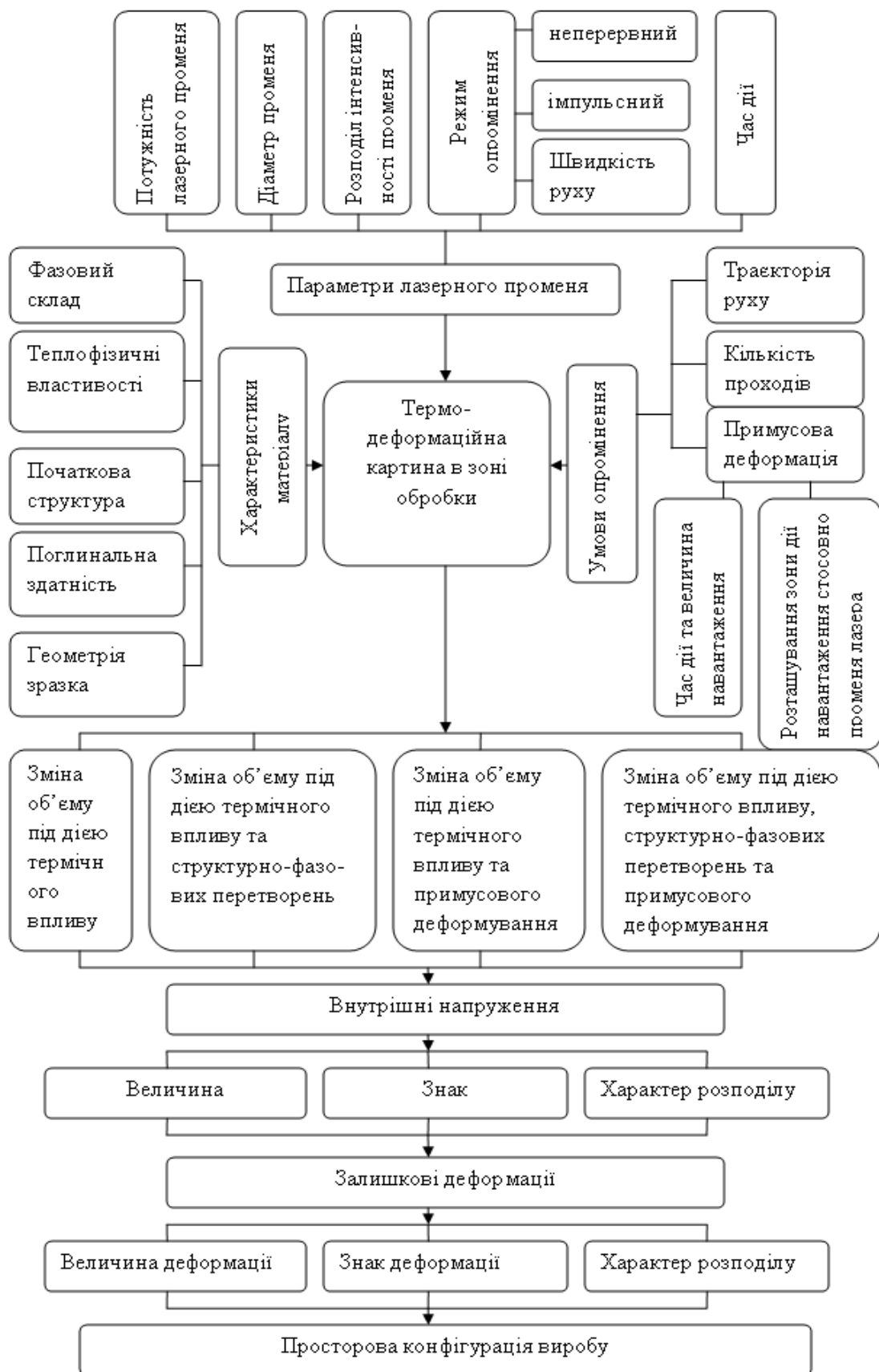


Рисунок 1 – Фактори, що впливають на процес лазерного формоутворення

При цьому для дослідження процесу лазерного формоутворення розроблена методика визначення величини деформації. Зразок закріплювали консольно в струбці таким чином, щоб лазерний промінь падав на поверхню зразка перпендикулярно. Вісь лазерного променя позиціонували на відстані 10 мм від місця закріплення. На відстані 10 мм від вільного краю зразка встановлювали індикатор переміщення для фіксування відносного переміщення вільного краю зразка. Напрямок прямолінійного лазерного проходу задавали перпендикулярним до довшої (100 мм) сторони зразка. Здійснювали почергові лазерні проходи та фіксували величину відносного переміщення вільного краю зразка за кожен прохід. Причому кожен наступний прохід збігався з попереднім за розміщенням на зразку. За величиною переміщень вільного краю зразка обраховували деформацію в градусах за кожен прохід, а їх сума становила загальну деформацію.

Для досліджень були обрані зразки з нержавіючої сталі аустенітного класу 12X18H10T та марганцевистої сталі 65Г як характерні представники своїх класів. Вибір цих сталей обумовлений тим, що в нержавіючих сталях аустенітного класу в діапазоні температур обробки не відбуваються поліморфні перетворення, натомість марганцевисті сталі здатні до мартенситних перетворень під час охолодження на повітрі. Отже, порівняння результатів формування зразків із цих сталей дозволить установити ступінь впливу поліморфних перетворень на процес лазерного формоутворення вуглецевих сталей.

Під час дослідження формування дисків, їх закріплювали на вертикальному стояку, базуючись на центральному отворі. Під час обробки варіювали режими: виставляли різну швидкість руху теплового джерела та різний діаметр зони фокусування, чим регулювали величину теплового вкладу в зону обробки. Окрім зміни режимів, змінювали також і траєкторію руху лазерного променя поверхнею зразка. Дослідження лазерного формування дисків проводили в кілька етапів.

На першому етапі проводили дослідження величини та розподілу деформації при опроміненні зразка за траєкторії: концентричне коло. Проводили одиничне, а потім повторне опромінення за тією самою траєкторією з фіксацією величини й характеру деформування зразка. Центр кола лазерного проходу збігався з центром кола диска. Далі зразки обробляли групою концентричних кіл за спіральними траєкторіями, починаючи з периферії та центра кола. Після цього фіксували зміни форми дисків. Формування дисків проводили поступовим обходженням лазерного променя по замкненій траєкторії, а також рівномірним одночасним нагріванням по всьому контуру. Це забезпечували за рахунок обертання зразка з частотою 11 000 об/хв. У такому випадку швидкість руху зони фокусування поверхнею зразка (за умови, що вісь променя лежить на діаметрі 96 мм) становитиме 3 315,84 м/хв. При цьому час опромінення кожної точки траєкторії становитиме (при діаметрі променя 3 мм)

$0,54 \cdot 10^{-6}$  с., а пауза до повторного опромінення –  $5,4 \cdot 10^{-3}$  с.

У процесі – експлуатації сформовані конструкції зазнають робочих навантажень різного знака та величини. Здатність конструкції зберігати сталу форму та положення під час експлуатації визначає її експлуатаційні характеристики. Тому визначення стійкості лазерносформованих конструкцій та порівняння її зі стійкістю конструкцій, сформованих обробкою тиском, є важливими завданнями. Для цього відбирали зразки у вигляді пластин, зігнутих на кут  $90^\circ$ , тотожні за розмірами та матеріалом (сталь 65Г та сталь 12X18H10T), але відмінні за способом формування. Ці зразки закріплювали в струбці за один край, а до вільного краю прикладали навантаження, спрямоване на розгинання сформованого кута. Для концентрації зусилля розгинання у вершині кута поверхні зразка, прилеглі до кута, затискали допоміжними пластинами. Під час прикладання навантаження вимірювали (за виміральною шкалою, °) повну деформацію зразка, після зняття навантаження вимірювали залишкову деформацію. Далі навантаження збільшувалося і вимірювання продовжували. Навантаження збільшували дискретно від величини 0,1 кг із кроком 0,1 кг. Таким чином, перевіряли стійкість сформованої конструкції до розгинання та порівнювали зі стійкістю конструкцій, сформованих класичним способом. Для визначення стійкості сформованих конструкцій до надмірного згинання відбирали зразки аналогічні до попереднього випадку. Навантаження прикладали у напрямку збільшення кута згинання. Так само фіксували повну та залишкову деформації. Навантаження змінювали аналогічно до попереднього випадку.

Необхідно зазначити, що, крім силових навантажень, конструкції в процесі експлуатації можуть сприймати й теплові навантаження або ж комбінації обох впливів. Для цього відбирали зразки з вуглецевої сталі 65Г та нержавіючої сталі 12X18H10T, половина з яких сформована лазерним способом, а інша половина – обробкою тиском. Зразки з одного матеріалу (наприклад, із сталі 65Г) попарно (сформований лазером + сформований обробкою тиском) поміщали в термічну піч, де проводили нагрівання до температури низького відпуску ( $200^\circ\text{C}$ ). Після нагрівання та охолодження виявляли наявність зміни форми зразка, та фіксували її величину. Наступну пару зразків нагрівали до температури середнього відпуску ( $400^\circ\text{C}$ ), охолоджували, після цього знову фіксували наявність та, за наявності, величину зміни форми. Наступну пару зразків піддавали високому відпуску ( $600^\circ\text{C}$ ) з подальшим охолодженням та вимірюванням. Останню пару зразків піддавали відпалу з подальшими аналогічними вимірами. Проводили порівняння результатів термічного впливу між зразками, сформованими різними методами. Аналогічні операції проводили зі зразками із сталі 12X18H10T.

## РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

*Дослідження впливу  
поліморфних перетворень  
на процес лазерного  
формування.*

Загалом абсолютна величина деформації прямо пропорційна кількості формувальних проходів як у разі обробки вуглецевих сталей, так і під час обробки нержавіючих сталей аустенітного класу. Однак при обробці вуглецевих сталей має місце явище «постдеформації» (рис. 2, 3), що може мати напрямок, який збігається з напрямком основної деформації або протилежний йому.

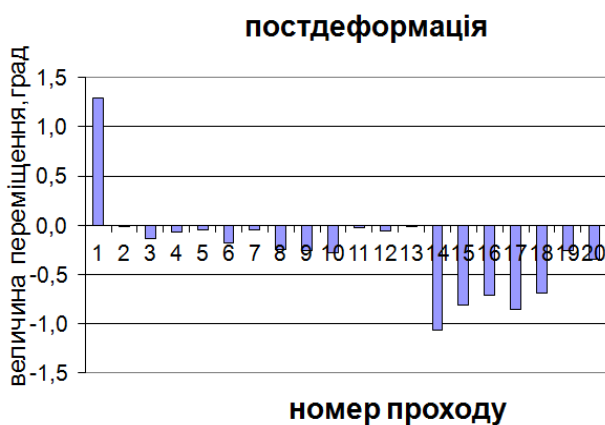
Явище «постдеформації» обумовлене проходженням поліморфних перетворень. Причому, при збільшенні діаметра променя чи швидкості обробки інтенсивність внесення енергії зменшується, швидкість нагрівання знижується, що дозволяє перетворенням відбутися повною мірою. Як наслідок, явище «постдеформації» набирає більш вираженого характеру, а напрямок стає протилежним до основної деформації та зменшує загальний кут згинання. При досягненні певного граничного значення величина «постдеформації» стає співмірною з величиною основної деформації, після цього формування припиняється.



а

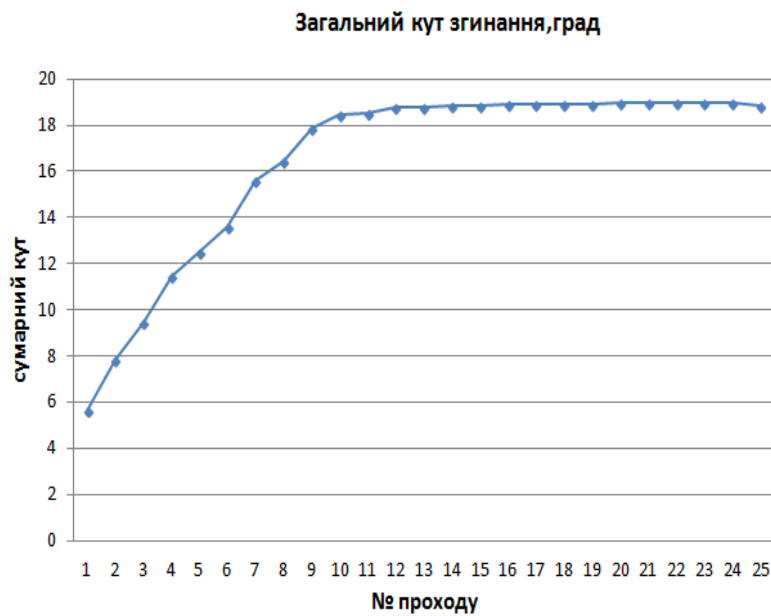


б



в

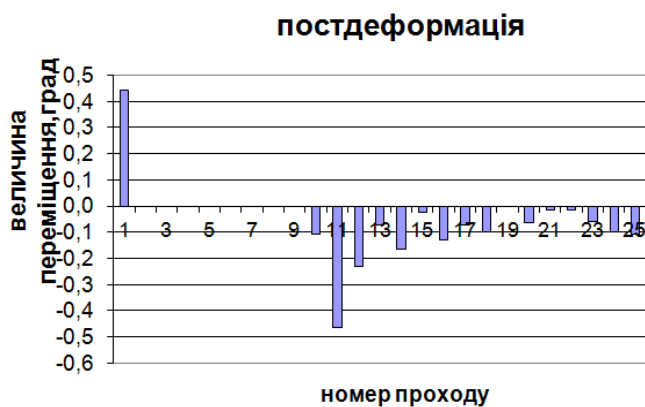
Рисунок 2 – Величини абсолютної – (а), відносної – (б) та постдеформації – (в) при збільшенні діаметру зони фокусування до 6 мм.



а



б



в

Рисунок 3 – Величини абсолютної – (а), відносної – (б) та постдеформації – (в) при збільшенні діаметру зони фокусування до 8 мм

Проходження поліморфних перетворень у вуглецевих сталях знижує продуктивність формування за допомогою механізму градієнта температур. Для оцінювання рівня впливу поліморфних перетворень на процес лазерного формоутворення проводили одночасне опромінення зразка зі сталі 65Г та сталі 12Х18Н10Т. Величини абсолютної та відносної деформацій в зразку з вуглецевої сталі були значно нижчими, ніж для нержавіючої сталі. Зокрема, за 34 проходи при потужності 0,8 кВт, швидкості 1,2 м/хв та діаметрі променя 3 мм зразок з нержавіючої сталі вдалося сформувати на 90°, натомість зразок із вуглецевої сталі – лише на 30° (рис. 4). Ці результати можуть бути інтерпольовані й на інші сталі, схильні до проходження поліморфних перетворень під час нагрівання та охолодження.

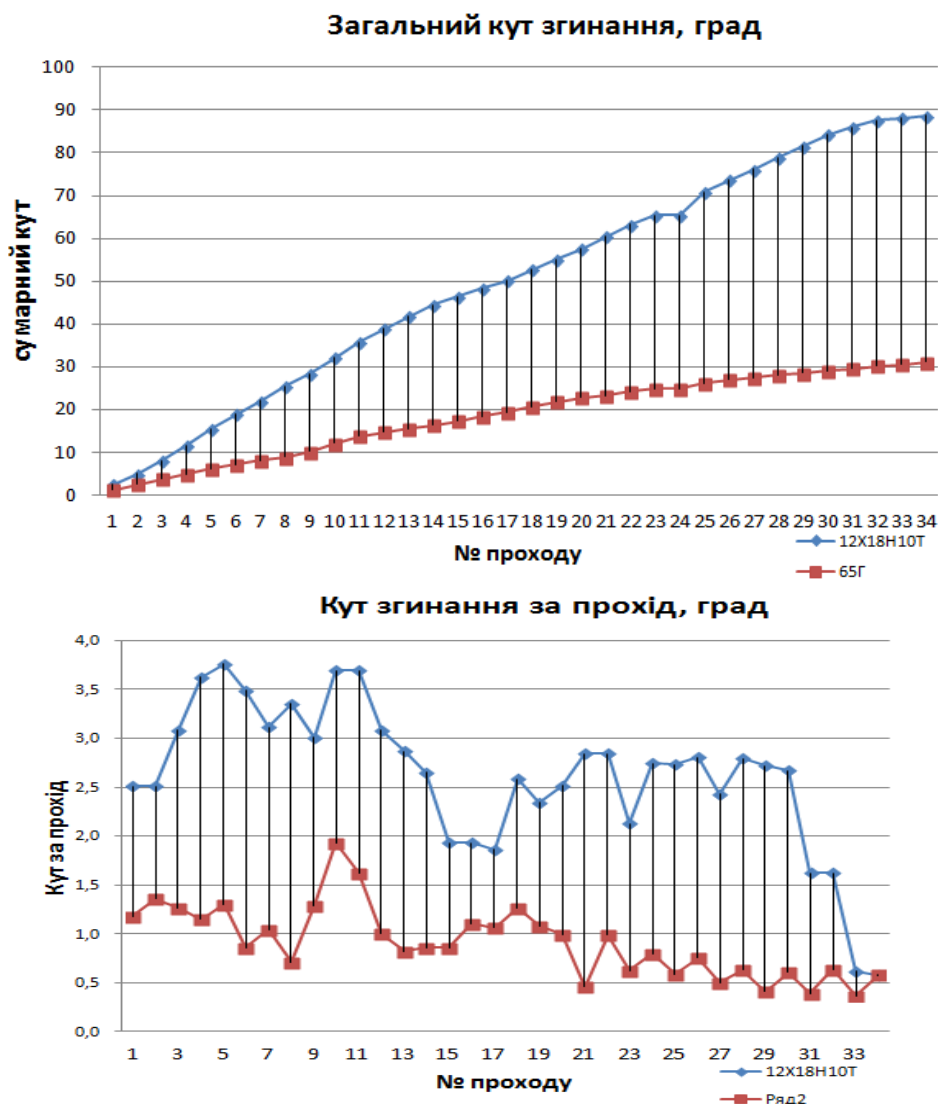


Рисунок 4 – Величини абсолютної та відносної деформацій при обробці зразків зі сталі 12X18H10T та сталі 65Г (потужність 0,8 кВт, швидкість променя 1,2 м/хв, розмір зони фокусування 3 мм, товщина зразків 0,5 мм)

#### Режими прогнозованого формоутворення

При лазерному формоутворенні недоцільно використовувати режими, при яких може відбутися оплавлення поверхні зразка, оскільки наявність рідкої фази підвищує крихкість зони обробки, знижує продуктивність процесу та спричиняє появу додаткових, слабоконтрольованих, внутрішніх напружень у зразку. Якщо швидкість руху лазерного променя чи діаметр променя надто великі чи потужність недостатня, то ефект формування буде відсутній. Тому є необхідність визначити область прогнозованого формування зразків.

Виконання серії експериментів із формування пластин дозволило виокремити поле режимів прогнозованого формування (рис. 5), за межами якого спостерігається або оплавлення поверхні зразка, що є небажаним, або відсутнє стабільне формування. Загалом можна зробити висновок, що при товщині зразка, співмірній із глибиною зони термічного впливу (ЗТВ), для досягнення бажаної величини деформації необхідно підвищувати швидкість обробки, що обумовлює відповідне

зменшення кількості проходів. За умов, коли товщина зразка більша за глибину ЗТВ, підвищення швидкості переміщення та збільшення кількості проходів зменшує продуктивність обробки, але підвищує її точність.

Дані діаграми побудовані для потужності променя 1 кВт, його діаметра 4 мм та варіації швидкості обробки.

#### Обладнання та методика

Експериментальні дослідження проводили на лазерних технологічних установках «Латус» на основі CO<sub>2</sub>-лазера з поздовжнім прокачуванням газової суміші та ROFIN DY 044 – на основі YAG-лазера з діодним накачуванням.

При цьому для дослідження процесу лазерного формоутворення розроблена методика визначення величини деформації. Зразок закріплювали консольно в струбцині таким чином, щоб лазерний промінь падав на поверхню зразка перпендикулярно. Вісь лазерного променя позиціонували на відстані 10 мм від місця

закріплення. На відстані 10 мм від вільного краю зразка встановлювали індикатор переміщення для фіксування відносного переміщення вільного краю зразка. Напрямок прямолінійного лазерного проходу задавали перпендикулярним до довшої (100 мм) сторони зразка. Здійснювали почергові лазерні проходи та фіксували величину відносного

переміщення вільного краю зразка за кожен прохід. Причому кожний наступний прохід збігався з попереднім за розміщенням на зразку. За величиною переміщень вільного краю зразка вираховували деформацію в градусах за кожен прохід, а їх сума складала загальну деформацію.

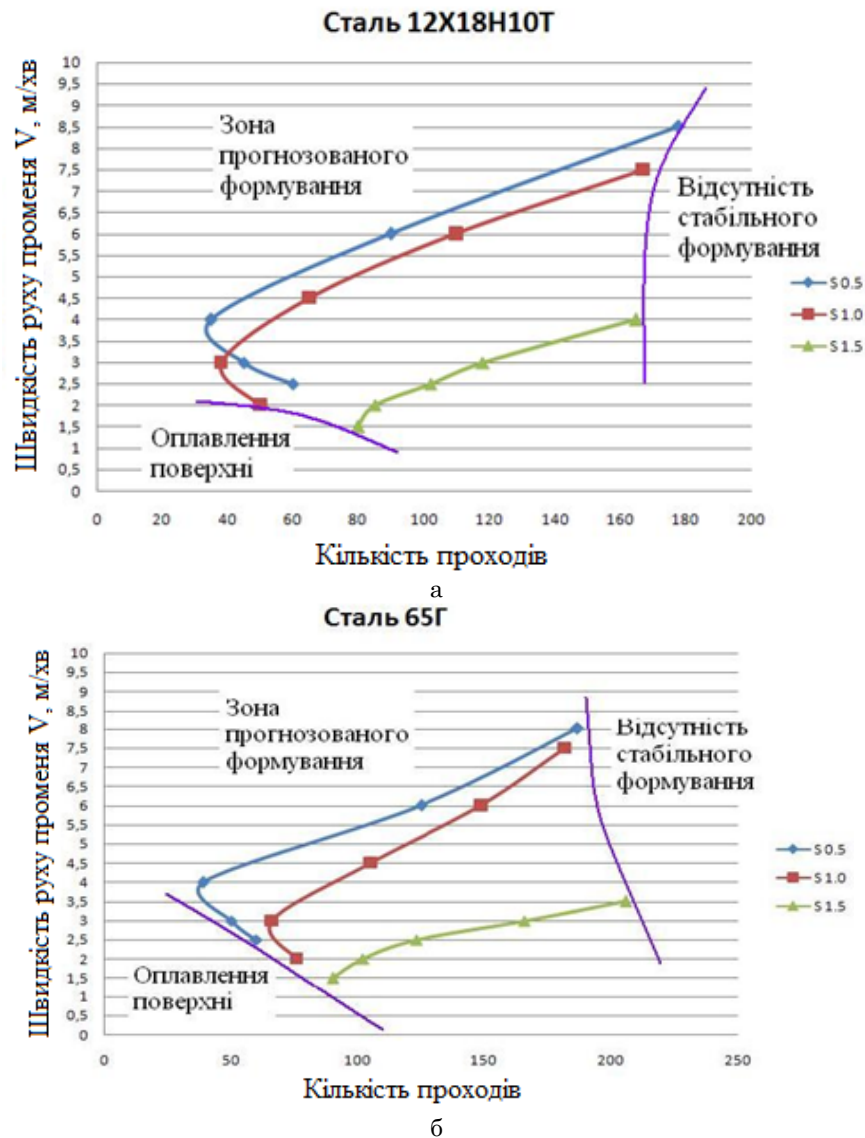


Рисунок 5 – Діапазон швидкостей переміщення лазерного променя, при якому досягалося формування на кут  $90^\circ$  зразків зі сталі 12X18H10T (а), 65Г (б) товщиною 0,5; 1,0; 1,5 мм, при потужності променя 1 кВт та діаметрі променя 4 мм

*Дослідження формування за криволінійними траєкторіями*

Дослідження формування за криволінійними траєкторіями проводили при формуванні дисків (рис. 6). У разі обходу точковим джерелом по замкненій кільцевій траєкторії вдалося одержати такі результати: якщо траєкторія нагрівання пролягала поблизу центра диска, чи на середині радіуса, було одержано сідлоподібну форму. Коли нагрівання проводили по зовнішньому краю, – рівномірний сегмент сфери. Коли траєкторія нагрівання являла собою концентричні кола

(нагрівання, починаючи від центра), оброблений зразок набував складної циклічної форми з чергуванням увігнутих та випуклих ділянок. У разі опромінення концентричними колами від периферії до центра, як і у випадку опромінення за спіральною траєкторією, зразки набирали сідлоподіблі форми.

Інша ситуація виникала при рівномірному нагріванні зразка. Незалежно від радіуса кільця опромінення результатом формуючої формою були сегменти сфери.



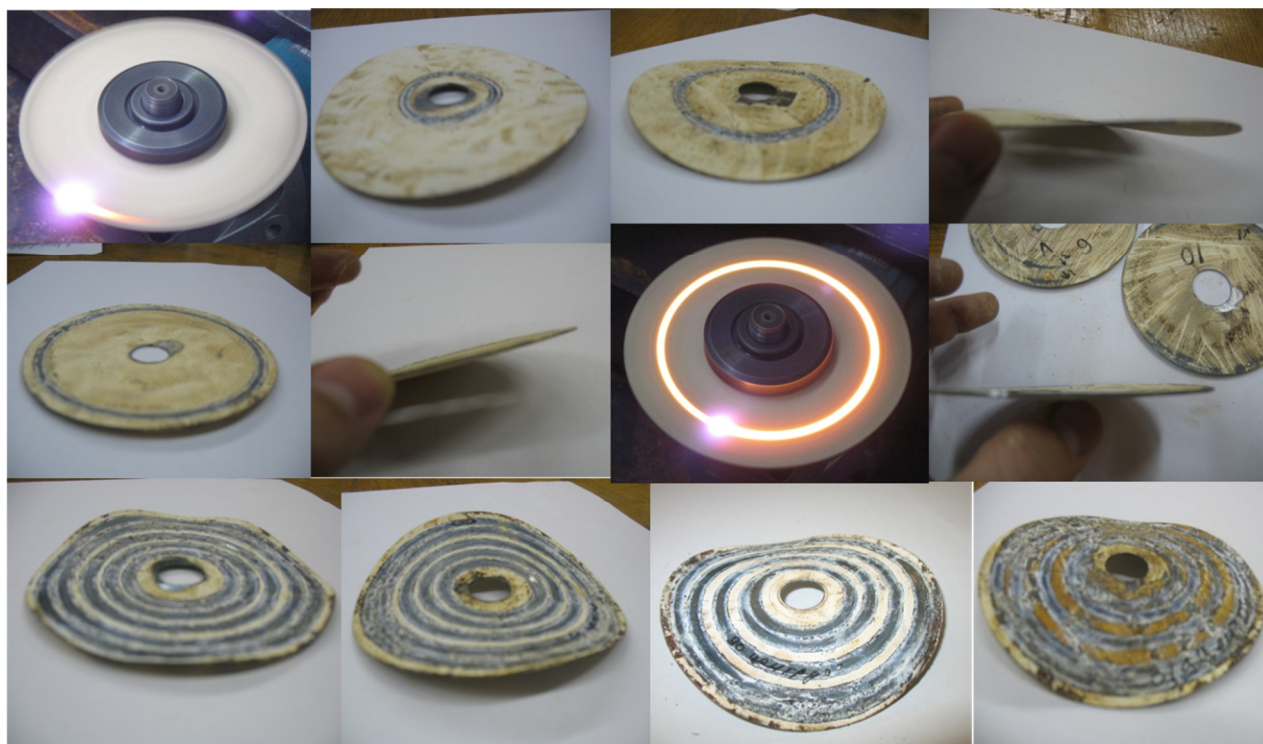


Рисунок 6 – Формування дисків

*Дослідження силової і теплової стійкості сформованих конструкцій*

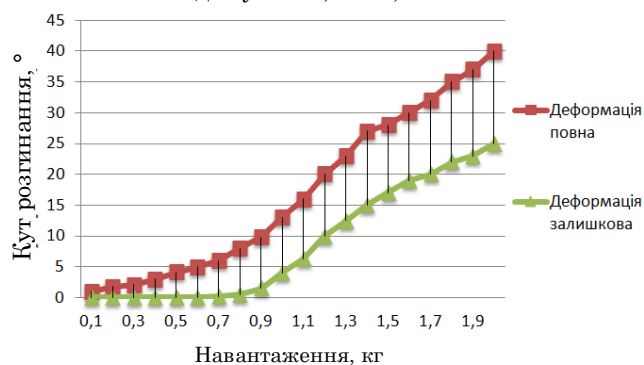
Під час дослідження силової і теплової стійкості сформованих зразків були одержані такі результати: при навантаженні на розгинання зразок нержавіючої сталі 12Х18Н10Т, сформований обробкою тиском до кута 90°, до навантаження 0,7 кг деформувався у пружній області без залишкової пластичної деформації. При подальшому навантаженні величина повної та залишкової деформацій збільшувалася. А за досягнення рівня навантаження 2 кг, величина повної деформації становила 40°, а залишкової – 25°. При обробці зразка, сформованого лазером, залишкова деформація проявилася при навантаженні 1 кг. А величина повної та залишкової деформації за навантаження 2 кг була на 28 % меншою, ніж у разі зразка, сформованого класичним способом, при навантаженні зразка легованої вуглецевої сталі 65Г (зігнутого до кута 90° класичним способом) залишкова деформація почала виникати при навантаженні 0,7 кг, При навантаженні 2,0 кг, величина повної деформації становила 27° а залишкової 11° (рис. 7 а); зразок сформований за допомогою лазера деформувався в пружній області до навантаження 2 кг, при якому проявилася залишкова пластична деформація величиною 1°. Після проходження значення навантаження 2 кг, величина пластичної деформації зростає зі збільшенням навантаження, але продовжує бути меншою (більше ніж на 50 %) за пластичну деформацію зразка, сформованого класичним способом, при відповідному навантаженні.

При подальшому згинанні у зразку зі сталі 12Х18Н10Т, сформованому обробкою тиском,

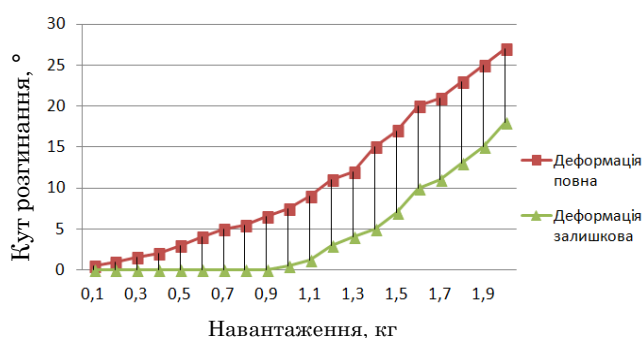
залишкова пластична деформація проявилася при навантаженні 0,4 кг, що менше на 0,3 кг, ніж у досліді на розгинання, але при досягненні навантаження 2 кг величина повної та залишкової деформацій також була меншою на 3° та 5° відповідно. Дослідження зразка, сформованого лазером дало такі результати: залишкова деформація проявилася при навантаженні 0,8 кг., що вдвічі більше, ніж для зразка, сформованого обробкою тиском, але значення повної та залишкової деформацій при навантаженні 2 кг перевищували відповідні значення для зразка, сформованого обробкою тиском, на 10°. Дослідження на подальше згинання зразків зі сталі 65Г показало дещо інші результати. В обох зразках (сформованого обробкою тиском та сформованого лазерним формоутворенням) залишкова деформація проявилася при навантаженні 1,2 кг. І хоча при навантаженні 2,6 кг значення повної та залишкової деформацій для зразка, сформованого обробкою тиском, були кращими, ніж для сформованого лазером (30° та 7° порівняно з 36° та 12° відповідно), та вже при навантаженні 2,7 кг почалося руйнування зразка, сформованого тиском, у місці згинання. Натомість лазерноутворений зразок продовжував сприймати навантаження без руйнування, при цьому значення повної та залишкової деформацій зростали.

Окрім силових навантажень, у процесі експлуатації сформовані конструкції можуть витримувати і теплові навантаження, тому існує необхідність перевірки міцності конструкцій, утворених лазерним формуванням, під дією цих навантажень та її порівнянням з міцністю конструкцій, сформованих за допомогою обробки тиском.

Нержавіюча сталь, пластично деформована до кута  $90^\circ$ ,  $S = 0,5$  мм

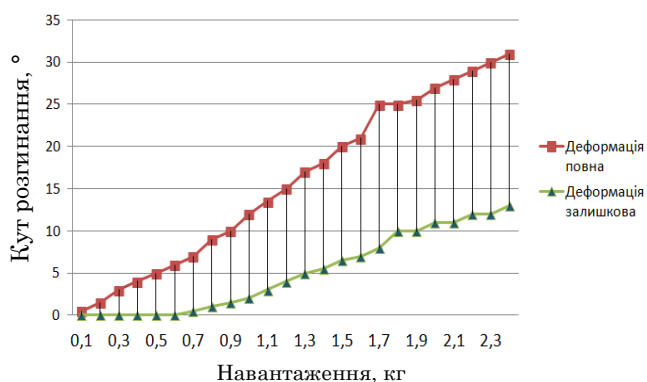


Нержавіюча сталь, деформована за допомогою лазера до кута  $90^\circ$ ,  $S = 0,5$  мм

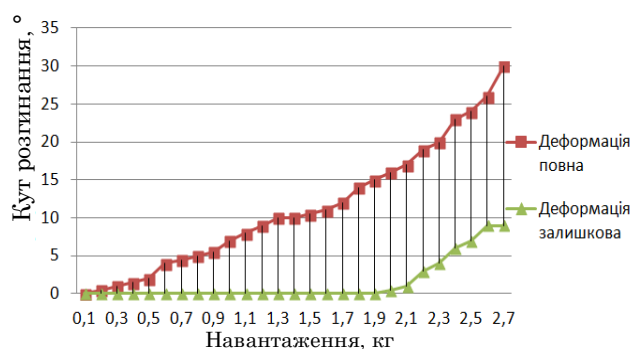


а

Сталь 65Г, пластично деформована до кута  $90^\circ$ ,  $S = 0,5$  мм



Сталь 65Г, деформована за допомогою лазера до кута  $90^\circ$ ,  $S = 0,5$  мм



б

Рисунок 7 – Результати досліджень сформованих зразків на силу стійкість для сталі 12X18H10T (а), 65Г (б)

Під час нагрівання зразків із нержавіючої сталі до температури  $200^\circ\text{C}$  та подальшого охолодження на повітрі за нормальних температур не відбувалося видимих змін форми. У разі коли теплове навантаження становило  $400^\circ\text{C}$  та  $600^\circ\text{C}$ , зміна форми зразків (сформованих обома способами формоутворення) була спрямована у бік зменшення кута згинання, а її величина була приблизно однакова і становила близько  $1^\circ$ .

Дослідження зразків зі сталі 65Г (за таких самих режимів теплового навантаження) показали, що під час нагрівання до температури  $200^\circ\text{C}$ , як і в попередньому випадку, зміни форми не відбуваються. При нагріванні до  $400^\circ\text{C}$  зразок, сформований обробкою тиском, деформувався у напрямку зменшення кута згинання на  $1^\circ$ , натомість форма зразка, сформованого лазерною обробкою, залишилася без змін. За умови нагрівання до температури  $600^\circ\text{C}$  зразок, сформований лазерним формоутворенням, змінював форму ідентично до зразка, утвореного обробкою тиском: відбувалося розгинання зразків приблизно на  $1^\circ$ .

Подальшу теплову обробку зразків проводили при їх нагріванні до температури  $850^\circ\text{C}$  із подальшим повільним охолодженням разом з піччю, у зразках зі сталі 65Г деформація відбувалася.

Причому в зразку, сформованому обробкою тиском, вона була спрямована на збільшення кута згинання і становила близько  $2^\circ$ . Натомість у зразках, сформованих лазерною обробкою, деформація була спрямована на зменшення сформованого кута і мала величину  $8^\circ$ .

У свою чергу, обробка за такого теплового режиму зразків із нержавіючої сталі не привела до істотних змін форми як для зразків, сформованих обробкою тиском, так і для зразків, утворених лазерним формоутворенням.

Крім того, лазерне формоутворення дозволяє формувати крихкі, пружні матеріали, матеріали з підвищеною жорсткістю та важкодеформівні матеріали. Зокрема, при формуванні зразка зі сталі 65Г товщиною  $1,5$  мм (рис. 8) за допомогою обробки тиском на зовнішній поверхні зразка утворювалися тріщини, що унеможливило експлуатацію виробу. Натомість за допомогою лазерного формоутворення вдалося сформувати зразок без дефектів, тріщин та руйнації.

За допомогою лазерного формоутворення можна отримувати вироби зі складним профілем різної форми та розмірів (рис. 9).

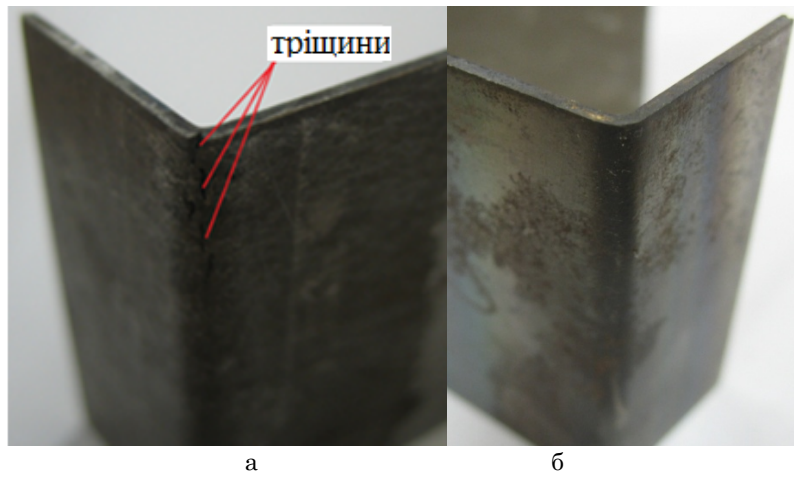


Рисунок 8 – Зразки зі сталі 65Г, сформовані обробкою тиском (а), лазерним формуванням (б)

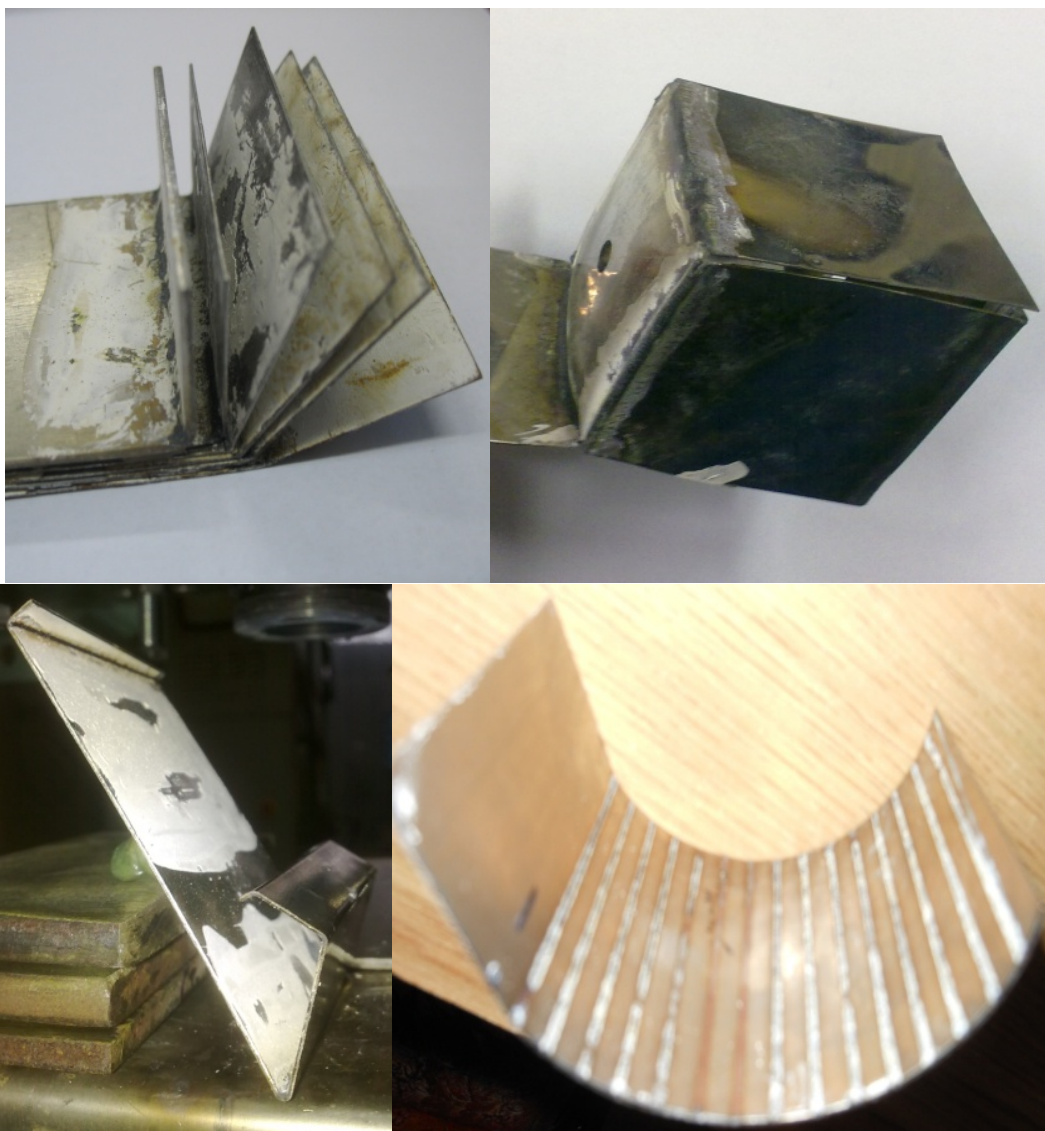


Рисунок 9 – Зразки, сформовані лазерним формуванням

## ВИСНОВКИ

1. Основними параметрами процесу лазерного формоутворення виробів із металевих листів, що визначають продуктивність, якість та вартість обробки, є: потужність лазерного випромінювання, розподіл енергії в перерізі променя, розмір зони фокусування та швидкість її переміщення, кількість теплових джерел і характер їх взаємного розміщення, кількість циклів нагрівання.

2. Доведено, що для отримання максимальної продуктивності (3–5°/прохід) необхідно проводити формоутворення при максимально можливій потужності випромінювання, мінімальних розмірах зони фокусування та оптимальній швидкості обробки; для досягнення найвищої точності (1–10°/прохід) доцільно проводити обробку при

підвищених швидкостях переміщення відносного руху, збільшуючи кількість циклів опромінення.

3. Для усіх видів оброблюваних металів величина деформації пропорційна кількості проходів та обернено пропорційна швидкості обробки. Для металів, яким властиві поліморфні перетворення, рівень деформацій у 2 та більше разів менший залежно від властивостей матеріалу. Для цих матеріалів є характерною наявність доцільної кількості проходів, які забезпечують для даних умов опромінення максимальний рівень деформації.

4. Силова стійкість лазерноформованих конструкцій як із нержавіючих, так і з вуглецевих сталей вища за стійкість конструкцій, сформованих обробкою тиском; теплова стійкість зразків, сформованих обома способами, співвірна.

## Laser Forming of Austenitic Stainless and Manganese Carbon Steels

O. D. Kahlyak<sup>1)</sup>, O. O. Honcharuk<sup>2)</sup>, N. O. Melnik-Kahlyak<sup>3)</sup>, M. O. Sklyar<sup>4)</sup>

<sup>1), 3)</sup> *National Technical University of Ukraine "KPI", 37, Victory Avenue, Kyiv, Ukraine, 03056*

<sup>2), 4)</sup> *National Academy of Sciences of Ukraine, V. Bakul Institute for Superhard Materials, 2, Avtozavodska St., Kyiv, Ukraine, 04074*

Laser forming has several advantages compared to the machining methods of workpieces. This method avoids springback effect, thinning of the material in the processing zone. It can form brittle, tough, elastic material, sheets of considerable low thickness using no specialized equipment. The lack of knowledge in this field constraints the application of the method and guaranty of actuality of the research in this field.

It was established that the power of laser radiation, energy distribution in the beam cross-section, the size of focus area and the speed of its movement, the number of heat sources and nature of their relative position, the number of cycles of heating are laser forming parameters that determine productivity, quality and cost of sheet processing. The article identifies working conditions of laser forming of austenitic stainless and manganese carbon steels. The experiment shows that strength of laser formed structures, made from both stainless and carbon steels are higher than one of plastically deformed structures. Meanwhile their thermal strength of the structures commensurate.

**Key words:** laser forming, laser surface treatment, thermal stresses, deformation, polymorphic transformation, brittle materials, materials with high rigidity.

## Лазерное формообразование нержавеющей сталей аустенитного класса и марганцевистых углеродородных сталей

А. Д. Кагляк<sup>1)</sup>, А. А. Гончарук<sup>2)</sup>, Н. А. Мельник-Кагляк<sup>3)</sup>, М. О. Скляр<sup>4)</sup>

<sup>1), 3)</sup> *Национальный технический университет Украины «КПИ», проспект Победы, 37, Киев, Украина, 03056*

<sup>2), 4)</sup> *Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАНУ, ул. Автозаводская, 2, Киев, Украина, 04074*

Лазерное формообразование по сравнению с обработкой давлением имеет следующие преимущества: отсутствует обратный пружинящий эффект, утонение материала в зоне обработки, позволяет формировать упругие, хрупкие материалы, а также не требует дополнительного специального оборудования. Поэтому изучение процесса лазерного формообразования является актуальной задачей.

Установлено, что основными параметрами процесса лазерного формообразования изделий из металлических листов, определяющими производительность, качество, а также стоимость обработки, являются: мощность лазерного излучения, распределение энергии по сечению луча, размеры зоны фокусирования и скорость ее перемещения, количество тепловых источников, а также характер их взаимного размещения, количество циклов нагрева. Доказано, что для повышения производительности и качества формообразования дисковых изделий целесообразно применять равномерное распределение теплового потока, которое обеспечивается за счет повышения скорости перемещения изделия до уровня значительного превышения скорости теплоотвода. Это позволяет достигать равномерного распределения деформации и стабилизировать процесс формирования, а также увеличить производительность. Показано, что конструкции, сформированные при помощи лазера, имеют стойкость к рабочим силовым и тепловым нагрузкам выше, чем конструкции, сформированные обработкой давлением. Это объясняется тем, что при обработке давлением в зоне

обработки происходит утонение стенок изделия, в свою очередь, при лазерном формировании, происходит обратный процесс – утолщение. Установлены основные закономерности процесса.

**Ключевые слова:** лазерное формообразование, лазерная поверхностная обработка, термические напряжения, деформация, полиморфные превращения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Yau C. L. A new analytical model for laser bending. : Laser Assisted Net Shape Engineering 2, Proceedings of the LANE'97 / C. L. Yau, K. C. Chan, W. B. Lee. 1997, Vol. 2, pp. 357–366.
2. Vollertsen F. Model for the temperature gradient mechanism of laser bending : Proceedings of the LANE'94 / F. Vollertsen, M. Rodle. 1994, Vol. 1, pp. 371–378.
3. Hu, Z. Computer simulation and experimental investigation of sheet metal bending using laser beam scanning. / Z. Hu, M. Labudovic, H. Wang. // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2001. – № 41. – pp. 589–607.
4. Pratoth S. Sahu. Optimization of process parameters involved in laser bending operation using taguchi experimental design method / Pratoth S. Sahu // Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology Rourkela MAY, 201.
5. Hoseinpour M. Gollo. Statistical analysis of parameter effects on bending angle in laser forming process by pulsed Nd:YAG laser / M. Hoseinpour Gollo, S. M. Mahdavian, H. Moslemi Naeini // Journal of Optics & Laser Technology, Vol. 43, No. 3, 2011. – pp. 475–482.
6. Amir H. Roohi. Effects of temperature gradient magnitude on bending angle in laser forming process of aluminium alloy sheets / H. Moslemi Naeini, M. Hoseinpour Gollo, J. Shahbazi Karami // Journal of computational and applied research in mechanical engineering Vol. 5, No. 2, 2016. – pp. 97–109
7. Magee J. Advances in laser forming. J. Magee, K. G. Watkins, W. M. Steen. – Journal of Laser Application 10 (1998). – pp. 235–246.
8. Arnet H. Extending laser bending for the generation of convex shapes. / H. Arnet, F. Vollertsen. – Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture 209, 1995. – pp. 433–442.
9. Chen, J. Modelling of Simultaneous Transformations in Steels. / J. Chen. // PhD thesis. – Department of Materials Science and Metallurgy University of Cambridge England February, 2009. – 156 p.
10. Cheng J. Microrstructure Integrated Modeling of Multiscan Laser Forming. J. Cheng, Y. Yao. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2002. Vol. 124. – pp. 379–387.
11. Kgomari L.C. Metallographic Analysis of Laser and Mechanically Formed HSLA Steel / L.C. Kgomari, R.K.K.Mbaya. – World Academy of Science, Engineering and Technology 70, 2010. – pp. 267–272.
12. Maji K. Experimental investigations and statistical analysis of pulsed laser bending of AISI 304 stainless steel sheet / K. Maji, D. K. Pratihari, and A.K. Nath // Journal of Optics & Laser Technology, Vol. 49, 2013. – pp. 18–27.
13. Roohi A. H. An experimental investigation of parameters effect on laser forming of Al6061-T6 sheets / A. H. Roohi, H. M. Naeini, and M. H. Gollo // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications. – 2015.
14. Kuntal Maji. Laser forming of a dome shaped surface: Experimental investigations, statistical analysis and neural network modeling / Kuntal Maji ,D. K. Pratihari, , A. K. Nath // Optics and Lasers in Engineering, 2014, Vol. 53. – pp. 31–42.
15. Folkersma G. In-plane laser forming for high precision alignment / G. Folkersma, G.-W. Römer; D. Brouwer // Optical engineering 53 (12), 2014. – 12 p.

## REFERENCES

1. Yau C. L. (1997) A new analytical model for laser bending.: Laser Assisted Net Shape Engineering 2, Proceedings of the LANE'97, Vol. 2, 357–366 [in English].
2. Vollertsen F. (1994) Model for the temperature gradient mechanism of laser bending Proceedings of the LANE'94, 1, 371–378 [in English].
3. Hu, Z., Labudovic, M., & Wang, H. (2001) Computer simulation and experimental investigation of sheet metal bending using laser beam scanning. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 41, 589–607 [in English].
4. Pratoth S. Sahu. Optimization of process parameters involved in laser bending operation using taguchi experimental design method Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology Rourkela MAY, 201 [in English].
5. Hoseinpour M. Gollo., Mahdavian, S. M., & Moslemi Naeini, H. (2011) Statistical analysis of parameter effects on bending angle in laser forming process by pulsed Nd:YAG laser. Journal of Optics & Laser Technology, Vol. 43, 3, 475–482 [in English].
6. Amir H. Roohi, Moslemi Naeini, H., Hoseinpour Gollo, M., & Shahbazi Karami, J. (2016) Effects of temperature gradient magnitude on bending angle in laser forming process of aluminium alloy sheets. Journal of computational and applied research in mechanical engineering Vol. 5, 2, 97–109 [in English].
7. Magee, J., Watkins, K. G., & Steen, W. M. (1998) Advances in laser forming. Journal of Laser Application 10, 235–246 [in English].
8. Arnet, H., & Vollertsen, F. (1995) Extending laser bending for the generation of convex shapes. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture 209, 433–442 [in English].
9. Chen, J. (2009) Modelling of Simultaneous Transformations in Steels. PhD thesis. – Department of Materials Science and Metallurgy University of Cambridge England February, 156 p [in English].
10. Cheng, J., Yao, Y. (2002) Microrstructure Integrated Modeling of Multiscan Laser Forming. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 124, 379–387 [in English].
11. Kgomari, L. C., & Mbaya, R. K. K. (2010) Metallographic Analysis of Laser and Mechanically Formed HSLA Steel. World Academy of Science, Engineering and Technology 70, 267–272 [in English].
12. Maji, K., Pratihari, D. K., & Nath, A. K. (2013) Experimental investigations and statistical analysis of pulsed laser bending of AISI 304 stainless steel sheet. Journal of Optics & Laser Technology, Vol. 49, 18–27 [in English].
13. Roohi, A. H., Naeini, H. M., & Gollo, M. H. (2015) An experimental investigation of parameters effect on laser forming of Al6061-T6 sheets, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications [in English].
14. Kuntal, Maji, Pratihari, D. K., & Nath, A. K. (2014) Laser forming of a dome shaped surface: Experimental investigations, statistical analysis and neural network modeling. Optics and Lasers in Engineering Vol. 53, 31–42 [in English].
15. Folkersma, G., Römer, G. W., & Brouwer, D. (2014) In-plane laser forming for high precision alignment. Optical engineering 53(12), 12 p. [in English].