

УДК 621.326

## ОСОБЛИВОСТІ ЛАЗЕРНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ ЛИСТОВИХ МАТЕРІАЛІВ

*Проаналізовані механізми лазерного формоутворення. Приведені результати експериментальних досліджень. Напрацьовані рекомендації щодо режимів обробки вуглецевої сталі 65Г та нержавіючої сталі 12Х18Н10Т*

*Ключові слова: лазерне формоутворення, листові матеріали, деформація*

*Проанализированы механизмы лазерного формирования. Приведены результаты экспериментальных исследований. Нарботаны рекомендации относительно обработки углеродистой стали 65Г и нержавеющей стали 12Х18Н10Т*

*Ключевые слова: лазерное формирование, листовые материалы, деформация*

*The mechanisms of laser forming are analyzed. The results of experimental researches are presented. The recommendations for the treatment of carbon steel 65G and stainless steel 12Kh18N10T are presented*

*Key words: laser forming, sheet materials, deformation*

**О.Д. Кагльак**

Асистент\*

Контактний тел.: 068-322-99-67

E-mail: Kaglyak\_O@meta.ua

**О.О. Гончарук**

Асистент\*

Контактний тел.: 096-749-43-26

E-mail: Alexdgin@gmail.com

**Л.Ф. Головко**

Доктор технічних наук, професор\*

Контактний телефон: (044) 454-96-06

E-mail: Leongolovko@gmail.com

**А.М. Лутай**

Старший викладач

\*Кафедра лазерної техніки та фізико-технічних технологій

Національний технічний університет України «Київський

політехнічний інститут»

пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

Контактний тел.: 067-209-27-55

E-mail: lutay.a@yandex.ua

### 1. Вступ

Традиційно для надання листовим матеріалам просторової конфігурації використовується обробка тиском. Це, зокрема, обробка в згинальних та витяжних штампах. Зазначені технології цілком успішно справляються з формуванням деталей з невеликою кількістю згинів. Однак ці види обробки стикаються з цілим рядом проблем коли необхідно сформувати вироби складнішої конфігурації, або ж вироби виготовлені з пружних, крихких матеріалів. Також при обробці листів значної товщини необхідно використовувати надпотужне крупно габаритне обладнання, застосування якого пов'язане з суттєвими енергетичними та економічними затратами. Окрім того, існує явище зворотного ефекту, що погіршує точність обробки, можливе потоншення матеріалу в зоні обробки та не достатня стійкість до розгинання. А також, існують складності в обробці крупно габаритних виробів, та формуванні полічок менших за бмм.

Задля уникнення згаданих проблем почали розвиватися способи тепло-деформаційного формоутворення (ТДФ) за допомогою локального лінійного на-

грівання. В цих методах використовують різні джерела теплової енергії, зокрема – високочастотне індуктивне нагрівання, обробка зварювальною дугою, обробка факелом газового пальника. Однак, зазначені способи ТДФ також мають певні недоліки, пов'язані з визначенням величини теплової енергії та місцем її прикладання для отримання потрібної форми, а також певні проблеми з повторюваністю результатів. Зокрема, використання зварювальної дуги для формоутворення листових матеріалів ускладнене наступними особливостями: зварювальна дуга, як джерело теплової енергії, слабо контрольована і при збільшенні швидкості переміщення теплового джерела відносно заготовки (чи навпаки), спостерігається нестабільність позиціонування зони розігрівання на заготовці. При високочастотному індуктивному нагріванні досить легко контролювати глибину проникнення теплового поля, оскільки вона залежить від частоти індукваного електричного поля. Однак цей метод не придатний для використання при нагріванні краю пластини, оскільки перегрівання майже неминуче, окрім того устаткування досить громіздке. використання газового пальника є найдешевшим з точки зору купівлі та обслуговуван-

ня, але як теплове джерело він слабо-контрольований, тому повторюваність результатів низька. Натомість лазерне випромінювання, як теплове джерело, чітко визначене, легко дозується та позиціонується, також лазерна обробка легко піддається автоматизації. Лазерне формоутворення (ЛФ) процес гнучкий та легко переналаштовується на нові види продукції, а також не потребує високовартісного інструменту.

## 2. Механізми лазерного формоутворення

В залежності від умов опромінення, властивостей оброблюваного матеріалу та параметрів лазерного променя, більшість дослідників виділяють наступні механізми лазерного формоутворення:

- механізм градієнту температур (МГТ);
- механізм випинання (МВ);
- механізм зсідання (МЗ);
- механізм поліморфних перетворень (МПП).

Щоправда, існує певна розбіжність в поглядах різних дослідників стосовно умов дії того чи іншого механізму формоутворення.

Механізм градієнту температур являється найбільш вивченим механізмом лазерного формоутворення [1, 2]. Загалом, його можна описати наступним чином: під час швидкісного нагрівання поверхні лазерним променем, інтенсивно нагріваються верхні шари матеріалу, в той час як нижні залишаються холодними (в силу локальності процесу) і поступово нагріваються за рахунок теплопровідності, в результаті чого виникає різкий перепад температури (градієнт температур) по товщині зразка, що призводить до різного теплового розширення різних шарів матеріалу, та викликає формування листа.

В початковий момент нагрівання, теплове розширення на опроміненій поверхні (верхній) вище ніж на холодній поверхні (нижній). Відбувається попереднє згинання, яке має протилежний до основного згинання напрямку, в результаті на опроміненій поверхні формується невелика деформація розтягу. Із закінченням нагрівання, згинальний момент набуває протилежного напрямку до попереднього згинання. В момент коли термічні напруження досягають температурно-залежних напружень пластичної течії металу, будь-яке додаткове теплове розширення перетворюється в пластичну деформацію стиснення, оскільки вільне розширення обмежене оточуючим матеріалом. Під час охолодження відбувається локальне скорочення верхніх шарів листа, і кут згинання зростає у напрямку на зустріч лазерному променю.

### Механізм випинання.

Якщо змінювати параметри процесу то можна перейти до механізму випинання [2, 3]. Зазвичай у випадку механізму випинання, діаметр лазерного променя значно більший за товщину листа. Він становить близько десяти товщин, на відміну від МГТ, де діаметр променя спів розмірний з товщиною листа. Тобто, у випадку МВ не має різкого перепаду температур (точніше, незначний градієнт, порівняно з градієнтом коли працює МГТ) по глибині зразка. Під час нагрівання теплові напруження стискування розвиваються в листі, і призводять до термопружних напружень, які в свою чергу призводять до локального термопластично-пружно-

го випинання матеріалу. Це випинання генерується вздовж напрямку руху лазерного сканування. Коли лазерний промінь закінчує обробку листа, випинання генерується по всій довжині листа. Зразок може деформуватися як в позитивному так і в негативному напрямках, залежно від факторів що включають параметри процесу. Параметри які визначають напрямки випинання мають комплексний характер, що ще раз підтверджує важливість систематизації факторів впливу. Як і у випадку МГТ кут згинання може бути збільшений повторенням процесу опромінення.

### Механізм зсідання МЗ [1, 3]

Для МЗ параметри процесу обираються подібно до МВ, але розмір опроміненої зони значно менший порівняно з товщиною листа. Завдяки нагріванню близькому до рівномірного, та обмеженню теплового розширення оточуючим матеріалом, лист стискається майже постійним напруженням вздовж товщини, що пояснюється скороченням листа та збільшенням його товщини. Якщо лист опромінюється вздовж лінії попереку ширини, то виникають напруження стискування. Повторення процесу приводить до збільшення загальної товщини.

### Механізм поліморфних перетворень (МПП). [2, 4]

В матеріалах, для яких під час нагрівання та охолодження характерне протікання поліморфних перетворень, діє ще один механізм формування. Це механізм поліморфних перетворень. Найяскравіше МПП можна продемонструвати на прикладі перетворень у вуглецевих сталей. Під час нагрівання, при переході через лінію РСК (діаграма залізо-вуглець) починається перетворення фериту в аустеніт. При цьому відбувається зміна кристалічної решітки, що призводить до локальної зміни об'єму матеріалу. Після припинення лазерного нагрівання в результаті активного відведення тепла в сусідні (не прогріті) шари матеріалу, відбувається процес автогартування, який призводить до утворення структури гартування (мартеніт), «набрякання» кристалічної решітки та локальної зміни об'єму матеріалу. Це призводить до додаткової деформації зразка, при чому напрямку цієї деформації може співпадати, або ж бути протилежним до напрямку деформації, викликаній іншими механізмами формування.

## 3. Схема проведення експерименту

Оброблялися зразки з нержавіючої сталі аустенітного класу та низько легованої вуглецевої сталі 65Г з розмірами 100x50мм товщиною 0,5..1,5мм. На поверхню зразка наносилося покриття з оксиду цинку. Зразок закріплювався консольно в струбціні. На відстані 10мм від місця закріплення, променем твердотілого YAG-лазера з діодним накачуванням, неперервної дії здійснювався прохід на всю ширину зразка. На відстані 10мм від вільного краю зразка встановлювався індикатор переміщення, рис.1.

Переміщення математично обраховувалося та визначалась величина деформації, котра представлялася у вигляді кута згинання (град), та відображалася на графіках, рис. 6-17.

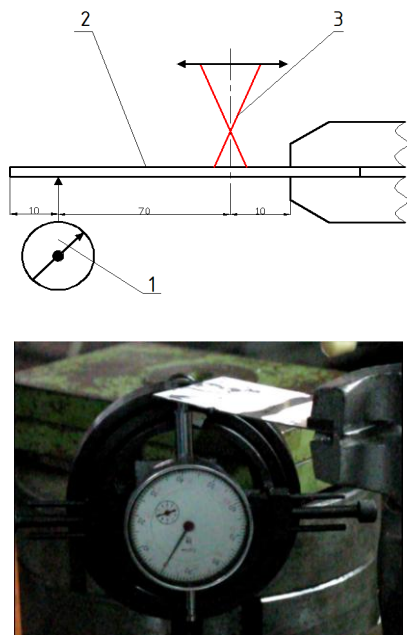


Рис. 1. Схема проведення експерименту: 1 – індикатор переміщень, 2 – зразок, 3 – лазерний промінь.

#### 4. Результати експериментальних досліджень

При проведенні обробки за допомогою твердотілого лазера з діодним накачуванням, були отримані результати дещо відмінні від результатів для обробки за допомогою CO<sub>2</sub> лазера [5]. Це пояснюється на порядок меншою довжиною хвилі випромінювання твердотілого лазера, оскільки менша довжина хвилі краще поглинається металами.

Зокрема, при обробці зразка з нержавіючої сталі 12X18H10T товщиною 0,5 мм., при потужності 1кВт., діаметрі фокальної плями 4 мм. та при швидкості переміщення 3 м/хв., кута згинання 90° було досягнуто за 45 проходів, деформація відбувалася на зустріч лазерному променю і збільшувалася після кожного наступного проходу (рис. 2 а, б).

При обробці зразка з вуглецевої сталі 65Г товщиною 0,5 мм., за такого ж як в попередньому випадку режиму обробки, кут згинання 90° було досягнуто за 48 проходів, деформація також відбувалася на зустріч лазерному променю і збільшувалася після кожного наступного проходу (рис. 3 а, б).

При збільшенні швидкості руху променя до 6 м/хв. (із збереженням потужності та діаметру плями), кута 90° вдалося досягнути за 90 проходів для сталі 12X18H10T, та за 125 проходів для сталі 65Г. Деформація відбувалася на зустріч лазерному променю і збільшувалася після кожного наступного проходу (рис. 4, 5).

У випадку формування зразка зі сталі 12X18H10T товщиною 1 мм., при потужності 1кВт., діаметрі зони фокусування 4мм. та швидкості переміщення променя 3м/хв., кут 90° було отримано за 38 проходів. Напрямок деформування та характер збільшення деформації були аналогічними до попередніх випадків (рис. 6).

Коли даний режим використовувався для обробки зразка сталі 65Г товщиною 0.8 мм., кут 90° було отримано за 66 проходів. При цьому напрямок та характер

формування був аналогічним до попередніх випадків (рис. 7).

Збільшення швидкості руху променя до 4.5 м/хв., для зразка товщиною 1мм. зі сталі 12X18H10T (зі сталими іншими параметрами) призвело до збільшення кількості (65 проходів) необхідних для досягнення кута 90°. При цьому напрямок та характер формування не змінився (рис. 8).

Подібна зміна швидкості для зразка зі сталі 65Г товщиною 0.8мм. тягне за собою збільшення кількості проходів необхідних для формування на кут 90° до 105. Характер та напрямок деформування залишився сталим (рис. 9).

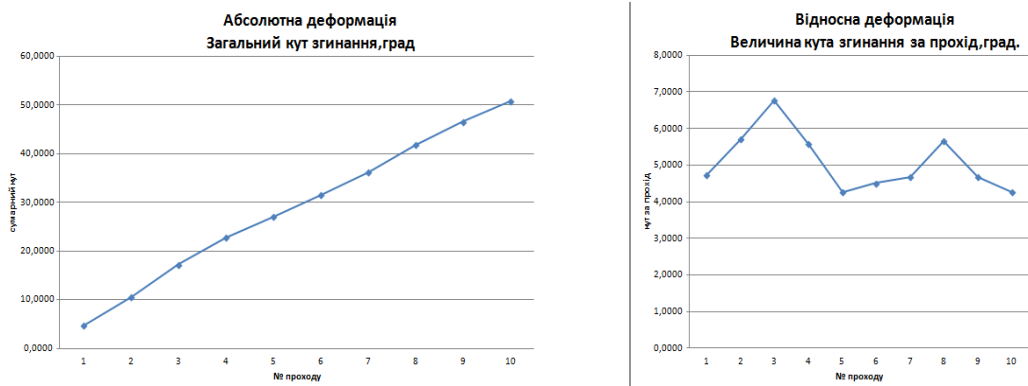
Далі розглянемо формування зразків товщиною 1.5 мм. за швидкості 3м/хв. (потужність променя та діаметр фокусування залишалися на сталому рівні). У зразку з нержавіючої сталі 12X18H10T напрямок та характер формування були аналогічними до попередніх випадків (рис. 10), проте, кількість проходів необхідних для формування на кут 90° збільшилася до 118.

При обробці зразка зі сталі 65Г (при зазначених умовах обробки), характер деформування, притаманний попереднім випадкам, порушився – проявилася явище «постдеформації». Тобто, після основного циклу формування, направлено на зустріч променю, відбувалося часткове зменшення сформованого кута за рахунок «пост деформації» рис. 11. При чому, кута 90° вдалося досягнути лише за 166 проходів.

Збільшення швидкості переміщення променя до 4.5м/хв. для таких же зразків як і в попередньому випадку привело до наступних результатів. Зразки як і зі сталі 12X18H10T, так і зі сталі 65Г сформувати до кута 90° не вдалося. Для нержавіючої сталі кут згинання становив 45°, а для вуглецевої 16°. При цьому, під час обробки зразка з нержавіючої сталі, спостерігалася «предеформація», яка мала знак протилежний до основної деформації і передувала їй. Величина цього деформування була приблизно однакова на кожному проході і становила близько 0.1°. Характер абсолютної та відносної деформації, для цього випадку, представлено на рис. 12.

В той же час, для сталі 65Г, при такому ж режимі обробки характерна не лише «предеформація», а й «постдеформація». Тобто, спочатку діє «предеформація», потім основна деформація, а в кінці «постдеформація», при чому напрямок «предеформації» та «постдеформації» протилежний до напрямку основної деформації формування рис. 13.

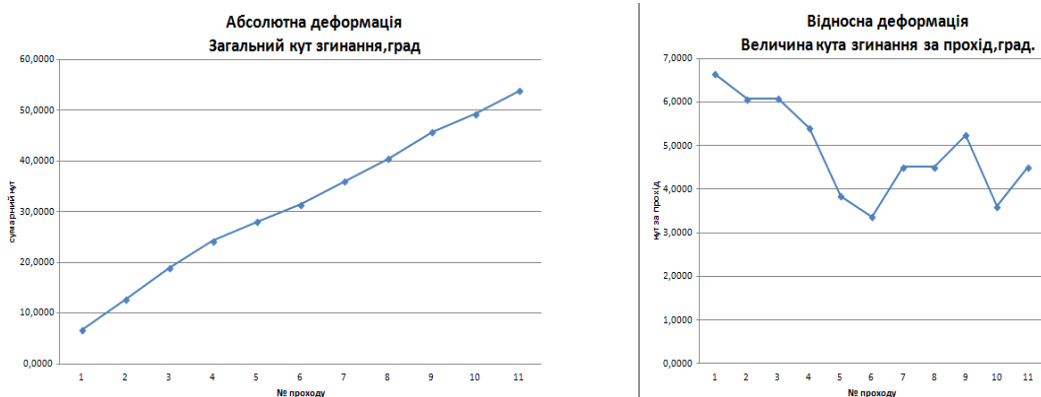
Поява, при збільшенні швидкості переміщення лазерного променя, «предеформації» та «постдеформації» обумовлене зменшенням енергетичного вкладу та зниженням інтенсивності нагрівання зони обробки. Що дозволяє вільно протікати процесам розширення локального об'єму та поліморфним перетворенням відбуватися в повній мірі. Очевидно, що при нижчих швидкостях руху променя (інтенсивнішому енергетичному вкладі), локальне теплове розширення обмежене холодними сусідніми областями матеріалу. При цьому, також підвищується швидкість нагрівання та охолодження оброблюваної області зразка, що впливає на перебіг поліморфних перетворень та призводить до утворення значної кількості залишкового аустеніту.



а

б

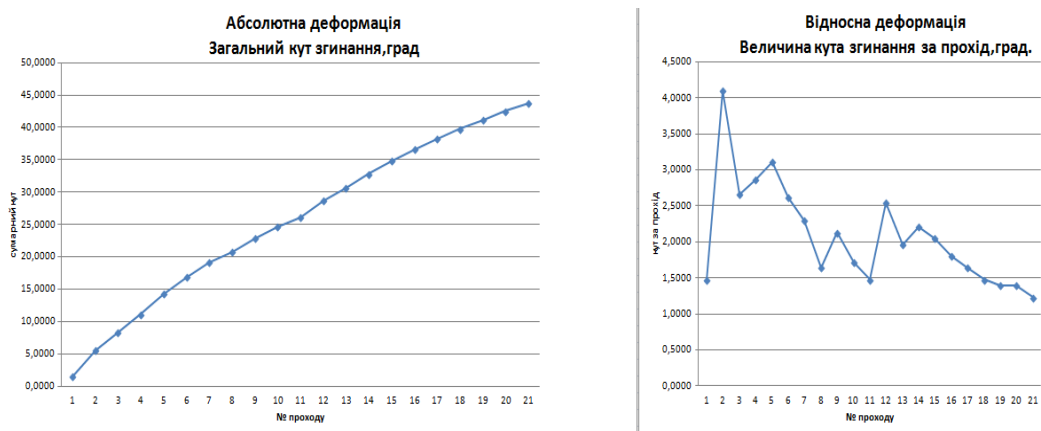
Рис.2. Величини абсолютної - а, відносної - б деформації для зразка з сталі 12X18H10Т товщиною 0.5мм (потужність-1 кВт, швидкість переміщення - 3,0 м/хв., діаметр фокальної плями - 4 мм.)



а

б

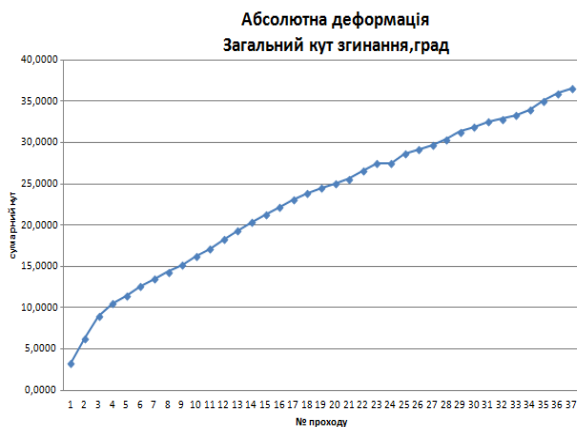
Рис. 3. Величини абсолютної - а, відносної - б деформації для зразка з сталі 65Г товщиною 0.5мм (потужність-1 кВт, швидкість переміщення - 3,0 м/хв., діаметр фокальної плями - 4 мм.)



а

б

Рис. 4. Величини абсолютної - а, відносної - б деформації для зразка з сталі 65Г товщиною 0.5мм (потужність-1 кВт, швидкість переміщення - 6,0 м/хв., діаметр фокальної плями - 4мм.)

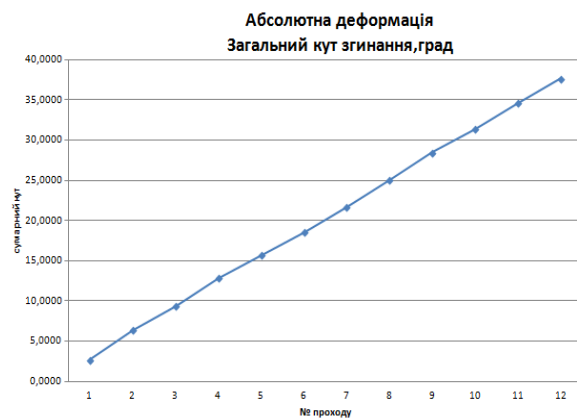


а



б

Рис. 5. Величини абсолютної - а, відносної – б деформації для зразка з сталі 65Г товщиною 0.5мм (потужність-1 кВт, швидкість переміщення – 6,0 м/хв., діаметр фокальної плями – 4мм.)



а



б

Рис. 6. Величини абсолютної - а, відносної – б деформації для зразка з сталі 12X18H10T товщиною 1 мм (потужність-1 кВт, швидкість переміщення – 3,0 м/хв., діаметр фокальної плями – 4 мм.)



а



б

Рис. 7. Величини абсолютної - а, відносної – б деформації для зразка з сталі 65Г товщиною 0.8мм (потужність-1 кВт, швидкість переміщення – 3,0 м/хв., діаметр фокальної плями – 4 мм.)

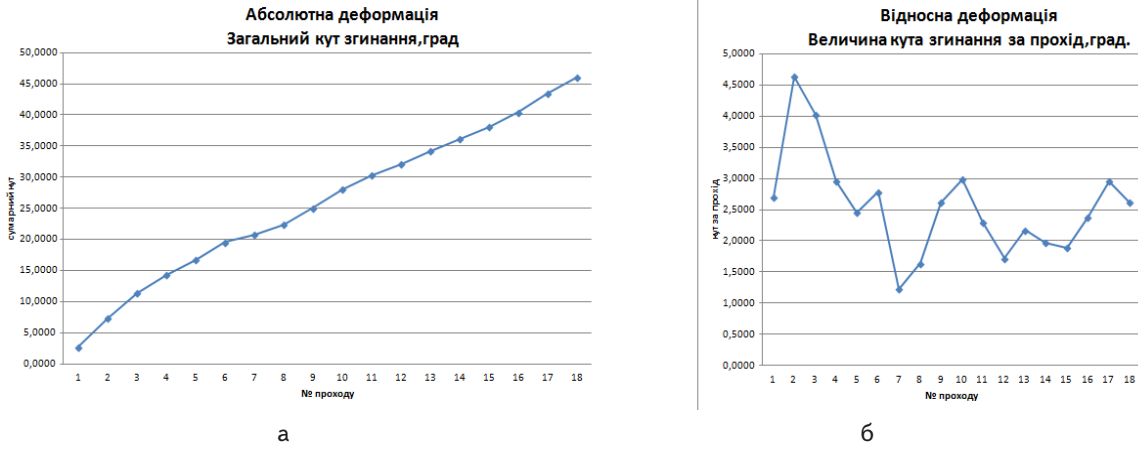


Рис. 8. Величини абсолютної - а, відносної – б деформації для зразка з сталі 12X18H10Т товщиною 1 мм (потужність-1 кВт, швидкість переміщення – 4,5 м/хв., діаметр фокальної плями – 4 мм.)

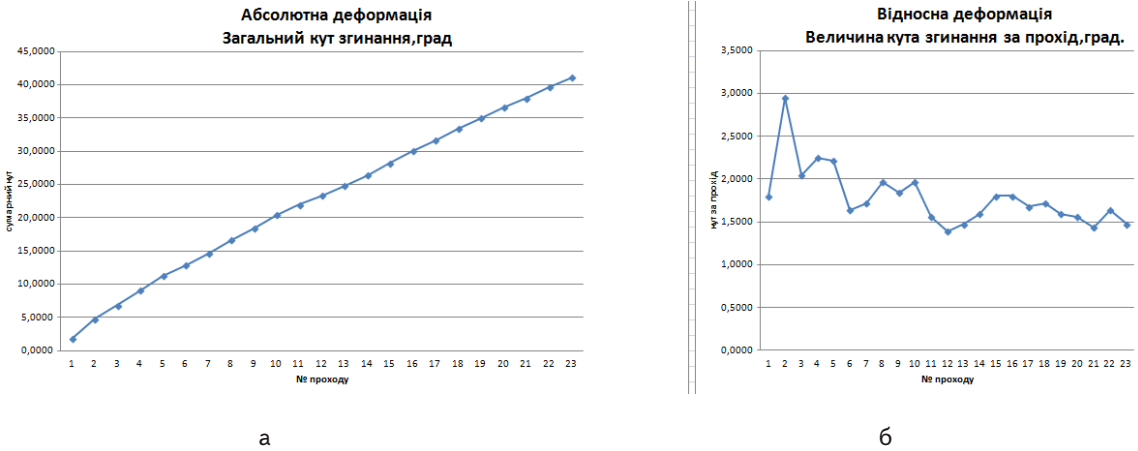


Рис. 9. Величини абсолютної - а, відносної – б деформації для зразка з сталі 65Г товщиною 0.8мм (потужність-1 кВт, швидкість переміщення – 4,5 м/хв., діаметр фокальної плями – 4 мм.)

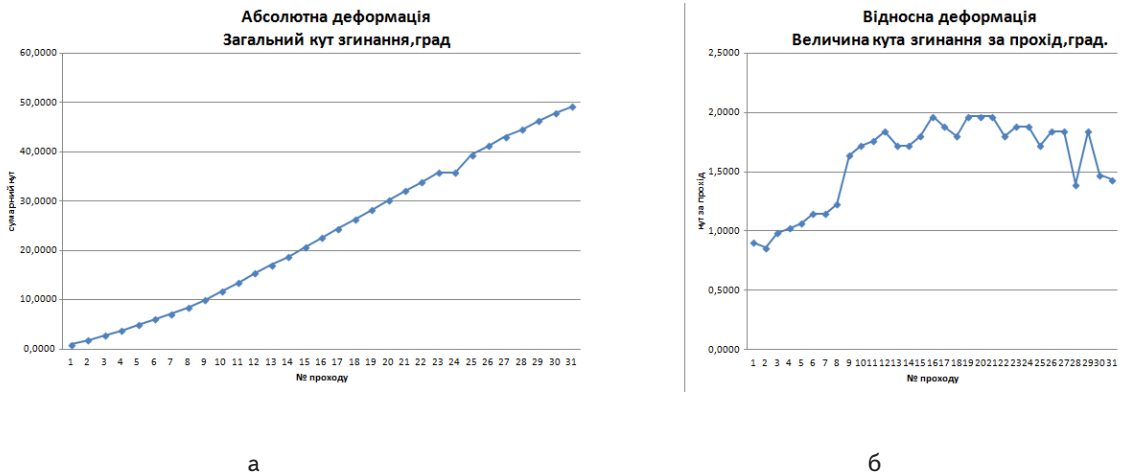


Рис. 10. Величини абсолютної - а, відносної – б деформації для зразка з сталі 12X18H10Т товщиною 1.5 мм (потужність-1 кВт, швидкість переміщення – 3 м/хв., діаметр фокальної плями – 4 мм.)



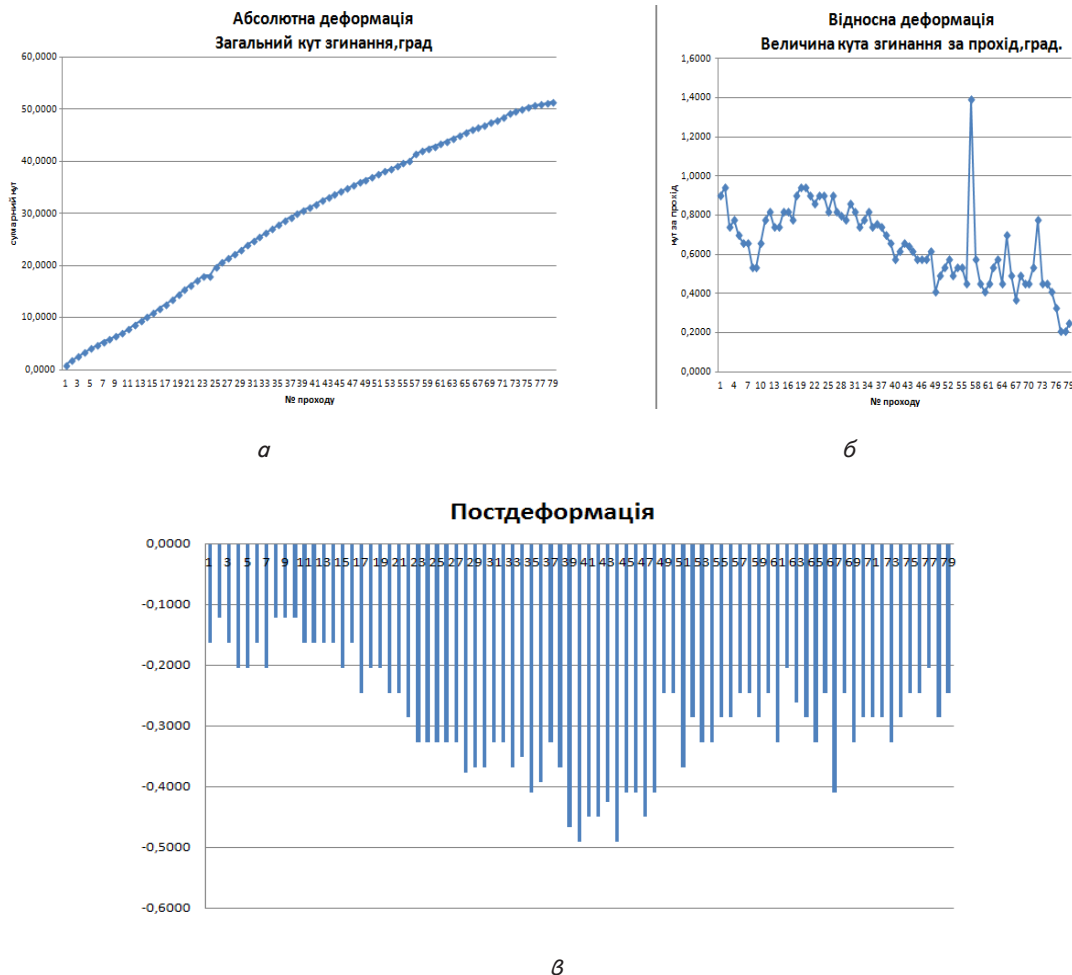


Рис.11. Величини абсолютної - а, відносної – б деформації та «пост деформації» - в, для зразка з сталі 65Г товщиною 1.5 мм (потужність-1 кВт, швидкість переміщення – 3 м/хв., діаметр фокальної плями – 4 мм.)



Рис. 12. Величини абсолютної - а, відносної – б деформації для зразка з сталі 12X18H10Т товщиною 1.5 мм (потужність-1 кВт, швидкість переміщення – 4.5 м/хв., діаметр фокальної плями – 4 мм.)

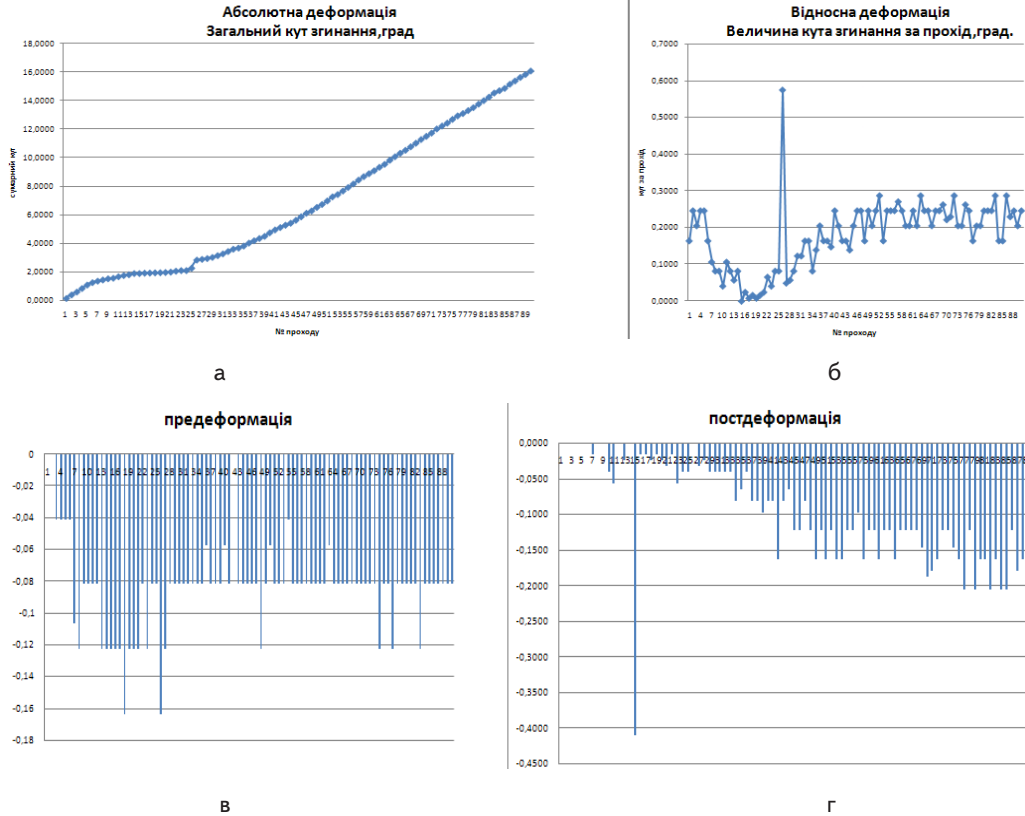


Рис. 13. Величини абсолютної - а, відносної - б деформації, «поредеформації» - в та «постдеформації» - г, для зразка з сталі 65Г товщиною 1.5 мм (потужність-1 кВт, швидкість переміщення - 4.5 м/хв., діаметр фокальної плями - 4 мм.)

### 5. Рекомендації

Проведення серії експериментальних досліджень дало змогу виокремити діапазон режимів, які забезпечують прогнозоване формування зразків різної товщини. Причому, характер залежностей як для нержавіючої сталі 12Х18Н10Т, так і для вуглецевої сталі 65Г був подібним (рис. 14).

Очевидно, що при малому (близько 1,5 м/хв.) значенні швидкості переміщення лазерного променя, за рахунок високого енергетичного вкладу, відбувається оплавлення поверхні зразка, що є небажаним під час процесу лазерного формоутворення. Збільшення швидкості усуває оплавлення поверхні та дозволяє проводити кероване формування. Подальше збільшення швидкості підвищує ефективність процесу (зменшує кількість проходів необхідних для формування на кут 90°). Збільшення ефективності процесу зі збільшенням швидкості руху лазерного променя відбувається до досягнення певного оптимуму, після проходження якого, ефективність процесу починає падати (збільшується кількість проходів необхідних для формування на кут 90°), але процес залишається контрольованим. Це падіння продовжується до моменту коли величина можливого формування зменшується і сформувати кут 90° не видається можливим.

Область прогнозованого формування займає досить широкий діапазон, що дозволяє плавно варіювати режими обробки.

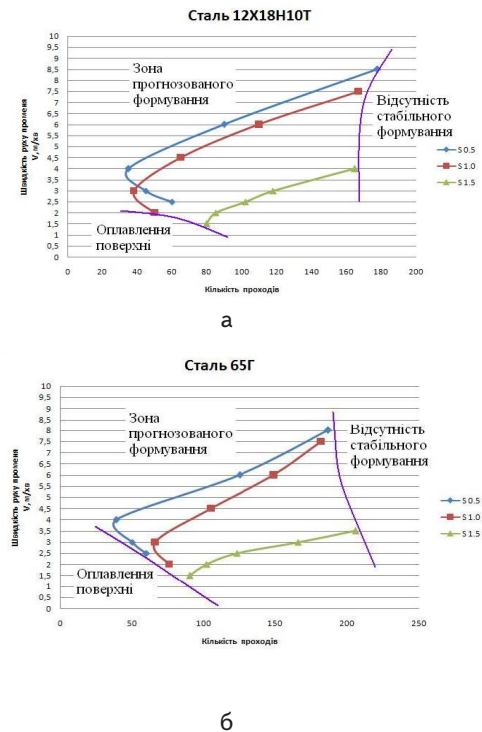


Рис. 14. Діапазон швидкостей переміщення лазерного променя, при якому досягалося формування на кут 90° зразків зі сталі 12Х18Н10Т (а) та сталі 65Г (б) товщиною 0,5; 1,0; 1,5 мм., при потужності променя 1кВт та діаметрі променя 4мм.



---

## 6. Висновки

---

- Проаналізовані механізми лазерного формоутворення, найбільш ефективним та керованим серед яких є механізм градієнту температур.
- Показано, що при опроміненні аустенітних сталей та сталей мартенситного класу характерна майже прямо пропорційна залежність величини деформації від кількості лазерних впливів. Однак, при високих швидкостях обробки в сталях аустенітного класу проявляється явище «предеформації», яке знижує величину основної деформації. В сталях мартенситного класу, окрім «предеформації» діє також «постдеформація», яка також знижує результат формувannya.
- При товщині зразка, співрозмірній з глибиною ЗТВ, для досягнення бажаної величини деформації слід 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.

---

## Література

1. Yau, C.L. A new analytical model for laser bending. / C.L. Yau, K.C. Chan, W.B. Lee. // Laser Assisted Net Shape Engineering 2, Proceedings of the LANE'97, Vol. 2, 1997, pp. 357–366.
2. Vollertsen, F. Model for the temperature gradient mechanism of laser bending / F. Vollertsen, M. Rodle. // Proceedings of the LANE'94, Vol. 1, 1994, 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 41 (2001), pp. 589–607.
4. Chen, J. Modelling of Simultaneous Transformations in Steels. / J. Chen. // PhD thesis. – Department of Materials Science and Metallurgy University of Cambridge England February, 2009
5. Кагляк, О.Д. Лазерне формоутворення просторових металевих конструкцій / О.Д. Кагляк, Л.Ф. Головка, О.О. Гончарук // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 6/1(42). – С. 4-11.