

ФОРМОУТВОРЕННЯ ПРОСТОРОВИХ КОНСТРУКЦІЙ З ЛИСТОВИХ МАТЕРІАЛІВ ЛОКАЛЬНИМ ЛАЗЕРНИМ НАГРІВАННЯМ

© Кагляк О.Д., 2013

Проаналізовано механізми лазерного формоутворення, найдослідженішим та найефективнішим є механізм градієнта температур. Наведено результати експериментальних досліджень. Величина деформації прямо пропорційна до кількості формувальних проходів, як і у разі оброблення вуглецевих сталей, так і під час оброблення нержавіючих сталей аустенітного класу. Під час оброблення вуглецевих сталей відбувається явище "постдеформації", яка може мати напрямок, що збігається з напрямком основної деформації, або протилежний до нього. Досліджена стійкість лазерноформованих конструкцій. Напрацьовано рекомендації щодо режимів оброблення металевих пластин.

Ключові слова: лазерне формоутворення, листові матеріали, деформація, теплові способи формоутворення, зона термічного впливу, формування, стійкість, рівномірне нагрівання, просторова конфігурація.

The mechanisms of laser forming are analyzed. The experimental result are presented. Treatment recommendation of carbon steel 65Г and stainless steel 12X18H10T are presented. The conditions and peculiarities of laser forming of low-carbon steel disks are explored.

Key words: laser forming, sheet material, deformation.

Вступ. Надання листовим матеріалам просторової конфігурації традиційно виконується за допомогою оброблення тиском. Це, зокрема, є оброблення у згинальних та витяжних штампах. Однак ці види оброблення стикаються з багатьма проблемами, коли необхідно сформувати вироби, виготовлені з пружних, крихких матеріалів. Також під час оброблення листів значної товщини необхідно використовувати надпотужне великогабаритне обладнання, застосування якого пов'язано з істотними енергетичними та економічними затратами. Окрім того, існує явище зворотного ефекту, що погіршує точність оброблення, можливе потоншення матеріалу в зоні оброблення та недостатня стійкість до розгинання. А також існують складнощі в обробленні великогабаритних виробів та формуванні полицок, менших за 6 мм.

Задля уникнення згаданих проблем почали розвиватися способи тепलोдеформаційного формоутворення (ТДФ) за допомогою локального лінійного нагрівання. У цих методах використовують різні джерела теплової енергії, зокрема, високочастотне індуктивне нагрівання, оброблення зварювальною дугою, оброблення факелом газового пальника. Однак зазначені способи ТДФ також мають певні недоліки, пов'язані з визначенням величини теплової енергії та місцем її прикладення для отримання потрібної форми, а також певні проблеми з повторюваністю результатів. Зокрема, використання згаданих джерел теплової енергії ускладнене тим, що вони слабо контролюються, важко позиціонуються, спостерігається схильність до оплавлення поверхні зразка. Натомість лазерне випромінювання як теплове джерело чітко визначене, легко дозується та позиціонується, також лазерне оброблення легко піддається автоматизації. Лазерне формоутворення (ЛФ) – процес гнучкий та легко переналаштовується на нові види продукції, а також не потребує дорогого інструменту.

Механізми лазерного формоутворення. Залежно від умов опромінення, властивостей оброблюваного матеріалу та параметрів лазерного променя більшість дослідників виділяють такі механізми

лазерного формоутворення: механізм градієнта температур (МГТ) [1–3]; механізм випинання (МВ) [2, 4, 5]; механізм зсідання (МЗ) [1, 4]; механізм поліморфних перетворень (МПП) [2, 6, 7].

Механізм градієнта температур є найвивченішим механізмом лазерного формоутворення. Загалом його можна описати так: під час швидкісного нагрівання поверхні лазерним променем інтенсивно нагріваються верхні шари матеріалу, в той час, як нижні залишаються холодними (через локальність 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.

Механізм випинання. Якщо змінювати параметри процесу, то можна перейти до механізму випинання. Переважно у випадку механізму випинання діаметр лазерного променя значно більший від товщини листа. Він становить близько десяти товщин, на відміну від МГТ, де діаметр променя співрозмірний з товщиною листа. Тобто у випадку МВ не відбувається різкого перепаду температур по глибині зразка. Під час нагрівання теплові напруження стискання розвиваються у листі і призводять до термопружних напружень, які, своєю чергою, призводять до локального термопластично-пружного випинання матеріалу.

Механізм зсідання МЗ. Для МЗ параметри процесу вибирають 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.

Механізм поліморфних перетворень (МПП) [2, 4]. У матеріалах, для яких під час нагрівання та охолодження характерний перебіг поліморфних перетворень, діє ще один механізм формування. Це є механізм поліморфних перетворень, який зумовлений локальною зміною об'єму матеріалу під час перебігу цих перетворень.

Схема проведення експерименту та методика виконання досліджень. Оброблялися зразки з нержавіючої сталі аустенітного класу та низьколегованої вуглецевої сталі 65Г з розмірами 100x50 мм товщиною – 0,5–1,5 мм. На поверхню зразка наносилось покриття з оксиду цинку. Зразок закріплювався консольно у струбціні. На відстані 10 мм від місця закріплення променем твердотільного YAG-лазера з діодним накачуванням неперервної дії здійснювався прохід на усю ширину зразка. На відстані 10 мм від вільного краю зразка встановлювався індикатор переміщення (рис. 1). Переміщення математично обраховувалося та визначалась величина деформації у вигляді кута згинання (град).

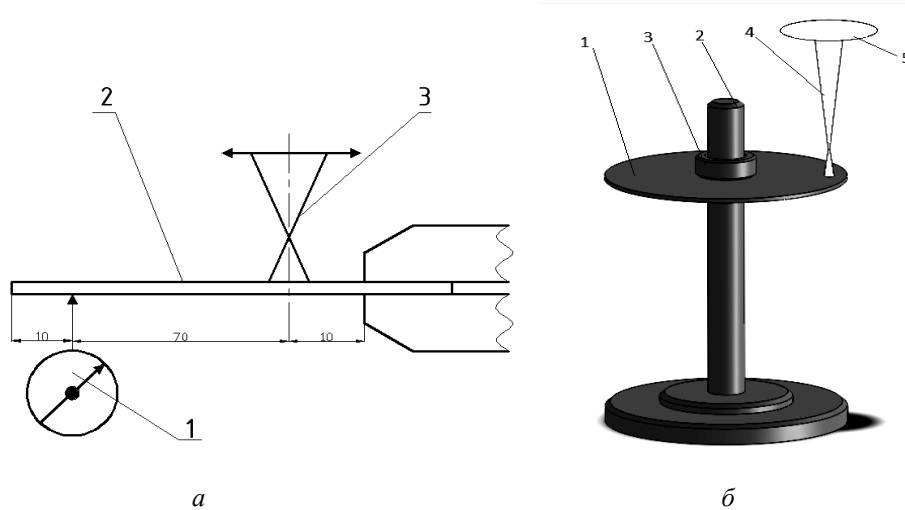


Рис. 1. Схема проведення експерименту: а – пластин (1 – індикатор переміщень, 2 – зразок, 3 – лазерний промінь); б – дисків (1 – зразок, 2 – стійка, 3 – фіксатор, 4 – лазерний промінь, 5 – лінза)

Результати експериментальних досліджень. Загалом абсолютна величина деформації прямо пропорційна до кількості формувальних проходів, як і у випадку оброблення вуглецевих сталей, так і під час оброблення нержавіючих сталей аустенітного класу. Однак під час оброблення вуглецевих сталей відбувається явище “постдеформації” [8, 9], яка може мати напрямок, що збігається з напрямком основної деформації, або протилежний до нього. Явище “постдеформації” зумовлене перебігом поліморфних перетворень. Причому за збільшення діаметра променя чи швидкості оброблення це явище набуває вираженішого характеру, а напрямок “постдеформації” стає протилежним до основної деформації та зменшує загальний кут згинання. За досягнення певного рубіжного значення величина “постдеформації” стає співрозмірною з величиною основної деформації, після чого формування припиняється.

Перебіг поліморфних перетворень у вуглецевих сталях знижує продуктивність формування за допомогою механізму градієнта температур. Для оцінки рівня впливу поліморфних перетворень на процес лазерного формоутворення проводилось одночасне опромінення зразка зі сталі 65Г та 12Х18Н10Т. Величини абсолютної та відносної деформації у зразку з вуглецевої сталі були значно нижчими, ніж для нержавіючої сталі. Зокрема, за 34 проходи за потужності 0.8 кВт, швидкості – 1.2 м/хв та діаметра променя 3 мм зразок з нержавіючої сталі вдалося сформувати на 90°, натомість зразок з вуглецевої сталі – лише на 30°.

У разі оброблення зразків завтовшки більше як 1.2 мм зі швидкостями близькими до 4.5 м/хв у нержавіючих сталях проявляється “предеформація”, протилежна за напрямком до головної деформації та передус їй. “Предеформація” зумовлена початковим тепловим розширенням верхніх шарів матеріалу і поступається місцем основній на етапі охолодження. У зразках з вуглецевої сталі після “предеформації” та головної деформації діє також “постдеформація”, яка має напрямок, протилежний до головної. Поява за збільшення швидкості переміщення лазерного променя “предеформації” та “постдеформації” зумовлена зменшенням енергетичного вкладу та зниженням інтенсивності нагрівання зони оброблення, що дає змогу вільно перебігати процесам розширення локального об’єму та повною мірою відбуватися поліморфним перетворенням. Очевидно, що за нижчих швидкостей руху променя (інтенсивнішого енергетичного вкладу), 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 великої кількості залишкового аустеніту.

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. 2).

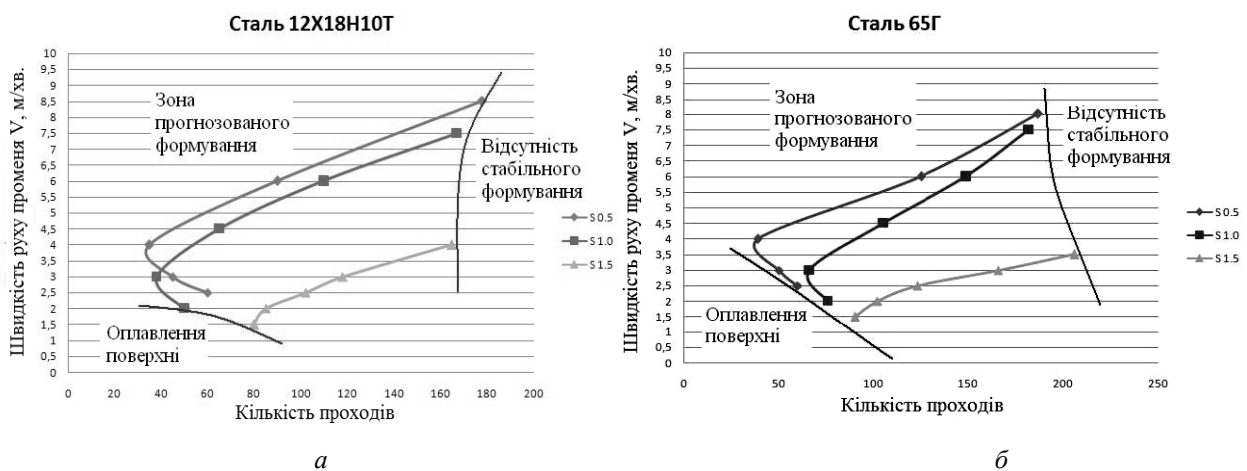


Рис. 2. Діапазон швидкостей переміщення лазерного променя, за якого досягалося формування на кут 90° зразків зі сталі 12Х18Н10Т (а) та сталі 65Г (б) завтовшки 0,5; 1,0; 1,5 мм, за потужності променя – 1 кВт та діаметра променя – 4 мм

Очевидно, що за малого (близько 1,5 м/хв) значення 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 дає змогу 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 доволі широкий діапазон, що дає змогу плавно варіювати режими оброблення.

Окремо потрібно зазначити, що лазерно сформовані конструкції мають вищу стійкість до силових навантажень порівняно з конструкціями, сформованими обробленням тиском, та не поступаються таким у стійкості до теплових навантажень. Детально дослідження стійкості сформованих конструкцій до теплових та силових навантажень наведено у [10]. Більше того, лазерне формоутворення дає змогу формувати матеріали, які під час формування обробленням тиском руйнуються (рис. 3).

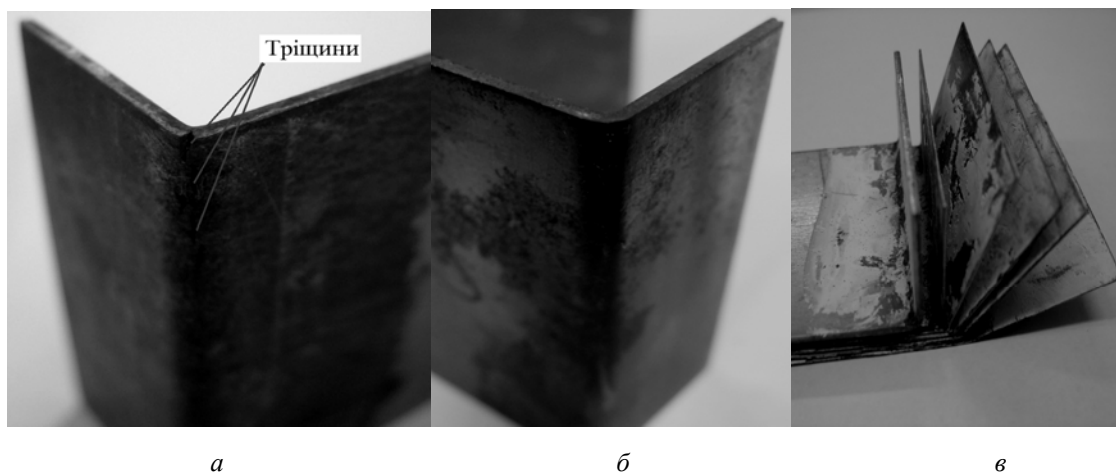


Рис. 3. Зразки зі сталі 65Г завтовшки 1,5 мм, сформовані за допомогою оброблення тиском (а) та за допомогою лазерного формоутворення (б); зразки різних марок сталей, сформовані лазерним нагріванням (в)

Опромінення зразків по прямолінійних траєкторіях уможливило формувати необхідний, наперед заданий кут (рис. 3, в), при цьому траєкторія кожного наступного проходження збігалась з попереднім.

Опромінення за паралельними траєкторіями, або за траєкторіями, які перехрещуються, дає змогу отримати вироби складної просторової конфігурації (рис. 4).

Формування під час опромінення за криволінійними траєкторіями вивчалось під час оброблення дисків з низьковуглецевої сталі (розвиток попередньої роботи [11]), в результаті чого були отримані такі результати. За опромінення дисків в околі центрального отвору та посередині радіуса диска (рис. 5, а), за швидкості руху променя поверхнею зразка 3 м/хв, діаметра променя 4 мм та потужності 0,8 кВт, деформація не була рівномірною. Зразки набули “сідлоподібної” форми. Така форма утворилась за рахунок перерозподілу напружень, які виникли у результаті послідовного обходу по колу лазерного променя. У разі опромінення диска за траєкторією, що пролягала на відстані 10 мм від зовнішнього краю диска, був отриманий результат, відмінний від попереднього. Розподіл деформації був рівномірним і був отриманий сегмент сфери (рис. 5, б).

При опроміненні зразка концентричними колами, починаючи від центра, була отримана складна просторова форма з чергуванням увігнутих та випуклих ділянок (рис. 5 в).

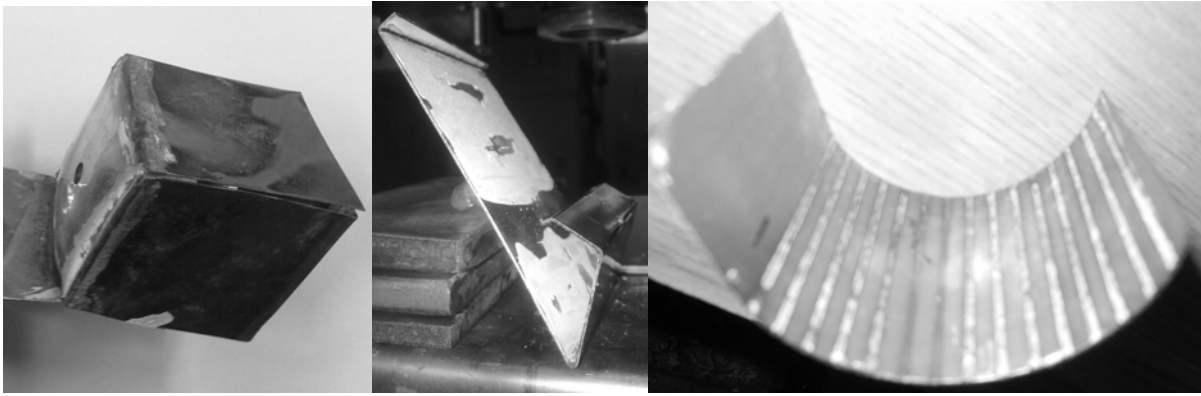


Рис. 4. Зразки, сформовані лазерним нагріванням

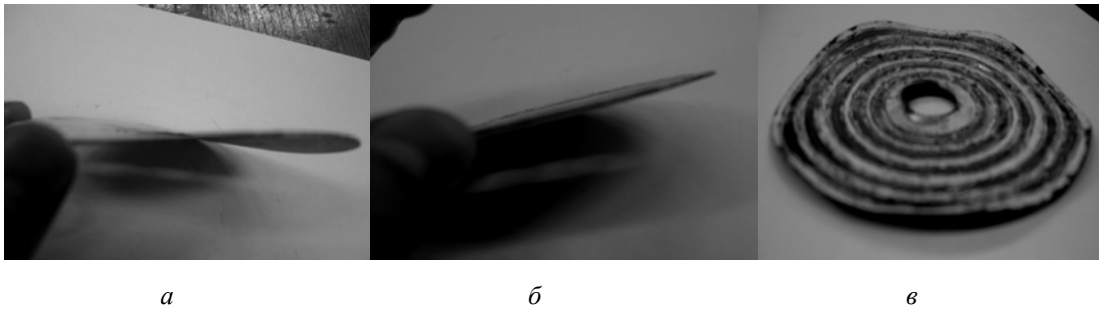


Рис. 5. Формування дисків: а – на середині діаметра диска; б – на відстані 10 мм від зовнішнього краю; в – концентричними колами від центра до периферії

Початок опромінення з кола найбільшого діаметра змінює результат оброблення та призводить до утворення сідлоподібної форми так само, як і оброблення дисків за спіральною траєкторією, як в напрямку від центра до периферії, так і в зворотному. Отже, можна зазначити, що в більшості описаних випадків не вдалося отримати рівномірний розподіл напружень, тому зразок формувався не рівномірно. Це відбувалося через те, що опромінення зразка відбувалося за рахунок послідовного обходу теплового джерела по замкненій траєкторії. При цьому нагрівання зразка на одній ділянці призводить до утворення теплодеформаційного фону на ще необроблених зонах, тобто умови оброблення кожної наступної ділянки зразка відрізняються від умов оброблення попередніх ділянок.

Для усунення цього ефекту нерівномірності зразок обертався з частотою 11000 об./хв, що дало змогу наблизити умови рівномірного нагрівання по замкненому контуру (рис. 6).

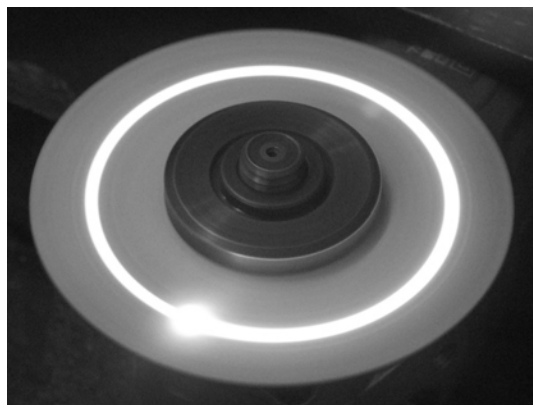


Рис. 6. Оброблення диска під час його обертання з частотою 11000 об./хв

У такому випадку швидкість руху зони фокусування поверхнею зразка (за умови, що вісь променя лежить на діаметрі 96 мм) становитиме 3315,84 м/хв. При цьому час опромінення кожної точки траєкторії становитиме (за діаметра променя 3 мм) $0,54 \cdot 10^{-6}$ с, а пауза до повторного опромінення – $5,4 \cdot 10^{-3}$ с. Величиною енергетичного вкладу в такому випадку зручно керувати за допомогою визначення часу опромінення.

За таких умов оброблення, незалежно від розташування проходу, зразки формувалися рівномірно по усій площині і утворювали сегменти сфери. З огляду на це, можна зауважити, що оброблення за умов рівномірного одночасного нагрівання дає змогу отримувати стабільніші та прогнозованіші результати, ніж за умови поступового обходу по контуру.

Висновки: 1. Проаналізовано механізми лазерного формоутворення, найефективнішим та найкеріванішим серед яких є механізм градієнта температур.

2. Показано, що за опромінення аустенітних сталей та сталей мартенситного класу характерна майже прямо пропорціональна залежність величини деформації від кількості лазерних впливів. Однак за високих швидкостей оброблення у сталях аустенітного класу проявляється явище “предеформації”, яка знижує величину основної деформації. У сталях мартенситного класу, окрім “предеформації”, діє також “постдеформація”, яка також знижує результат формування.

3. За товщини зразка, співрозмірної з глибиною ЗТВ, для досягнення бажаної величини деформації потрібно підвищувати швидкість оброблення, що зумовлює відповідне зменшення кількості проходів. За умов, коли товщина зразка більша за глибину ЗТВ, підвищення швидкості переміщення та збільшення кількості проходів зменшує продуктивність оброблення, але підвищує її точність.

4. Формування дисків для досягнення рівномірного розподілу напружень доцільно проводити за рівномірного одночасного нагрівання.

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. – P. 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. – P. 371–378.
3. Magee J. *Advances in laser forming* / J. Magee, K.G. Watkins, W.M. Steen // *Journal of Laser Application*. – 10 (1998). – P. 235–246.
4. 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. – P. 589–607.
5. Chen J. *Modelling of Simultaneous Transformations in Steels* / J. Chen // *PhD thesis. – Department of Materials Science and Metallurgy Univesity of Cambridge England February*. – 2009. – 156 p.
6. 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*. – 1995. – 209. – С. 433–442.
7. Cheng J. *Micorstructure Integrated Modeling of Multiscan Laser Forming*. J. Cheng, Y. Yao // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2002. – Vol. 124. – P. 379–387.
8. 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.
9. Кагляк О.Д. *Особливості лазерного формоутворення листових матеріалів* / О.Д. Кагляк, О.О. Гончарук, Л.Ф. Головка, А.М. Лутай // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. – 2012. – № 2/13(56). – С. 32–40.
10. Кагляк О.Д. *Стійкість металевих конструкцій, отриманих лазерним формуванням* / О.Д. Кагляк, О.О. Гончарук, О.В. Сіора, А.М. Палагеша, Н.О. Мельник // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. – 2012. – № 3/7(57). – С. 43–47.
11. Кагляк О.Д. *Лазерне формувальне оброблення дисків з низьковуглецевої сталі* / О.Д. Кагляк // *Технологический аудит и резервы производства*. – 2012. – №3/2 (5). – С. 15–17.