

2. Исследованы свойства векторно-параметрических сплайнов, они адекватны свойствам соответствующих полиномиальных сплайнов.

3. Показана возможность образовывать соответствующие порции поверхностей из векторно-параметрических сегментов третьей степени.

4. Исследованные векторно-параметрические порции поверхностей дают возможность получать векторно-параметрическую поверхность с заданной гладкостью.

5. В работе рассмотрены условия достижения полного второго (обеспечивается непрерывность второй квадратичной формы поверхности), порядка гладкости поверхностей с помощью сплайнов третьей степени, то есть достижение также непрерывности смешанных производных.

Литература

1. Фокс, А. Вычислительная геометрия [Текст]: пер. с англ. / А. Фокс, М. Пратт. — Москва: Мир, 1982. — 304 с.
2. Завьялов, Ю. С. Методы сплайн-функций [Текст] / Ю. С. Завьялов, Б. И. Квасов, В. Л. Мирошниченко. — Москва: Наука, 1982. — 352 с.
3. Ковтун, О. М. Поліноміальна крива третього степеня із управляючими точками, що належать кривій [Текст]: зб. наук. праць / О. М. Ковтун // Сучасні проблеми моделювання. — Мелітополь: МДПУ ім. Б. Хмельницького, 2015. — Вип. 4. — С. 63–67.
4. Голованов, Н. Н. Геометрическое моделирование [Текст] / Н. Н. Голованов. — М.: Издательство Физико-математической литературы, 2002. — 472 с.
5. Роджерс, Д. Математические основы машинной графики [Текст]: пер. с англ. / Д. Роджерс, Дж. Адамс. — М.: Мир, 2001. — 604 с.
6. Якунин, В. И. Геометрические основы автоматизированного проектирования технических поверхностей [Текст] / В. И. Якунин. — М.: Маи, 1980. — 86 с.
7. Watt, A. 3D Computer Graphics [Text] / Alan Watt. — Ed. 3. — Addison-Wesley, 2000. — 570 p.
8. Chen, L. A Comparison of Improvements for Shear Warp Algorithm Using Lagrange or Cubic Spline Interpolation [Text] / L. Chen, S. Hu // 2011 5th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. — IEEE, 2011. — P. 1–4. doi:10.1109/icbbe.2011.5780354
9. Herman, G. T. Shape-based Interpolation Using Modified Cubic Splines [Text] / G. T. Herman, C. A. Bucholtz, Jingsheng Zheng // Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Volume 13: 1991. — IEEE, 1991. — P. 291–292. doi:10.1109/iembs.1991.683941
10. Бадаев, Ю. И. Специальные сплайны из полиномов третьей, четвертой и пятой степеней в геометрическом моделировании [Текст]: монография / Ю. И. Бадаев, А. М. Ковтун. — О.: Феникс, 2011. — 315 с.
11. Бадаев, Ю. И. Апроксимация сплайнами на основе кривых с инцидентными точками [Текст]: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції / Ю. И. Бадаев, О. М. Ковтун // Сучасні проблеми геометричного моделювання (специальний випуск). — Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2003. — С. 75–77.
12. Бадаев, Ю. И. Векторно-параметричні сегменти, поверхні та тіла за інцидентними з ними точками [Текст] / Ю. И. Бадаев, О. М. Ковтун // Прикладна геометрія та інженерна графіка. Праці Таврійської державної агротехнічної академії. — Мелітополь: ТДАТА, 2003. — Вип. 4, Т. 18. — С. 37–40.

ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБУ ПОБУДОВИ КУБІЧНОГО ВЕКТОРНО-ПАРАМЕТРИЧНОГО БІСПЛАЙНА З КЕРУЮЧИМИ ТОЧКАМИ, ЩО ІНЦИДЕНТНІ ПОВЕРХНІ

Досліджено спосіб побудови бісплайна (векторно-параметричної поверхні) за допомогою кубічного сплайна з керуючими точками, що інцидентні поверхні. При чому було досягнуто гладкість другого порядку. Розроблено алгоритми для отримання бікубічної поверхні з першим, а потім і другим порядком гладкості. Наведено тестові приклади отриманих бісплайнів.

Ключові слова: векторно-параметричний сплайн, бісплайн, сплайн з керуючими точками, що інцидентні кривій, гладкість.

Ковтун Олександр Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра общинженерных дисциплин, Измаильский факультет Одесской национальной морской академии, Измаил, Украина, e-mail: ikra55@list.ru.

Ковтун Олександр Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра загальноінженерних дисциплін, Ізмаїльський факультет Одеської національної морської академії, Ізмаїл, Україна.

Kovtun Alexander, Izmail Faculty of Odessa National Maritime Academy, Izmail, Ukraine, e-mail: ikra55@list.ru

УДК 621.326

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.44413

**Романов Б. С.,
Кагляк О. Д.,
Лутай А. М.,
Головко Л. Ф.**

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ФОРМОУТВОРЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З ЛИСТОВИХ ТЕРМІЧНО ЗМІЦНЕНИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

У даній статті представлений аналіз сучасних технологій формоутворення листових деталей з алюмінієвих термічно зміцнених сплавів. Визначені технологічні переваги і недоліки методів формоутворення деталей з листових термічно зміцнених алюмінієвих сплавів. Розглянуто особливості запропонованого авторами способу лазерного формоутворення деталей з листових алюмінієвих сплавів. Визначено задачі дослідження для подальшої реалізації в авіаційній промисловості.

Ключові слова: лазерне формоутворення, листові матеріали, згинання, алюмінієві сплави, дробоударне формоутворення.

1. Вступ

Одним з найважливіших завдань машинобудування є розробка і впровадження нових та вдосконалення існуючих технологічних процесів виготовлення деталей з метою підвищення якості виробів, продуктивності праці і зниження енерговитрат. На даний момент часу існує багато різних способів формоутворення просторових

нующих технологічних процесів виготовлення деталей з метою підвищення якості виробів, продуктивності праці і зниження енерговитрат. На даний момент часу існує багато різних способів формоутворення просторових

листових конструкцій. Авіабудування специфічна галузь, яка має велику номенклатуру тонкостінних листових деталей — довгомірні панелі, обшивки фюзеляжу, крила та інші. Більшість деталей виготовляються в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва. Формоутворення традиційними методами (згинання на пресах, штампах і обробка дробом) не завжди дозволяє досягти необхідного результату, насамперед у зв'язку з великими габаритними розмірами і складною формою деталей, для яких потрібно виготовляти спеціальне оснащення.

Враховуючи, недоліки відомих способів, та умови виробництва, актуальним є розроблення нових гнучких високопродуктивних способів формування, зазначеними характеристиками володіє лазерне формоутворення.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

В конструкціях сучасних літаків використовують високоміцні листові матеріали — алюмінієві, титанові сплави, найбільше розповсюдження отримали сплави: Д16Т, 1163Т, 1973, В95, В95пчТ2, В95очТ2 та інші [1]. Дані сплави мають такі переваги: високу стійкість проти корозії, мають високу удільну міцність [2].

Однак при формоутворенні даних сплавів існує ряд технологічних проблем: формоутворення панелей подвійної кривизни, потребує спеціальної оснастки та великий об'єм викінчувальних робіт [3]. При формоутворенні панелей одинарної кривизни дуже часто виникає необхідність правки і локальної корекції виробу [4].

Існуючі способи формоутворення таких деталей: деформування на пресах, дробоструменевою обробкою, ручним вибиванням на шаблонах є багато-перехідними, трудомісткими процесами і вимагають спеціального технологічного оснащення і високої кваліфікації виконавців [5].

Тому, проблема формоутворення термічно зміцнених алюмінієвих сплавів на сьогоднішній день не втрачає своєї актуальності. Більш того, зростають вимоги до якості виготовлення листових деталей, прагнення до підвищення продуктивності обладнання та виключенню ручних доводочних робіт підкреслюють затребуваність досліджень, спрямованих на створення і впровадження в технологічну практику нового обладнання і процесів формоутворення.

3. Об'єкт, мета та задачі дослідження

Об'єктом дослідження являються процеси формоутворення листових термічно зміцнених алюмінієвих сплавів.

Метою роботи є розширення можливостей формування листових термічно зміцнених алюмінієвих сплавів для авіаційної промисловості, шляхом використання процесу лазерного формоутворення.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

- 1) проаналізувати класичні методи формоутворення листових термічно зміцнених алюмінієвих сплавів;
- 2) дослідити процес лазерного формоутворення для визначення його переваг та недоліків;
- 3) розглянути перспективи впровадження технології лазерного формоутворення високоміцних листових алюмінієвих сплавів в авіаційній промисловості.

4. Аналіз технологій формоутворення термічно зміцнених алюмінієвих сплавів

Основними технологіями формоутворення термічно зміцнених алюмінієвих сплавів є: вільне згинання на пресовому обладнанні, вальцювання на трьох та чотирьох валкових листозгинальних машинах, дробоструменево формоутворення, згинання з розтягуванням на спеціальних роботах або обтяжних пресах, лазерне формоутворення, а також комбіновані методи [6, 7].

Вільне згинання на пресах являється одним з найбільш універсальних методів формоутворення. Ця технологія застосовується для формоутворення обшивки одинарної кривизни. Дана технологічна операція не може використовуватись як основна, тому що обмежена класом деталей одинарної кривизни [6]. Основним недоліком формоутворення обшивок пресовим згинанням є втрата кривизни при подальшій зміцнювальній обробці дробом. Також, слід зазначити, що згинання обшивок даним методом значно поступається по продуктивності, згинанню на валкових машинах. Даний метод потребує високої кваліфікації працівників та є надзвичайно трудомістким [8].

Деталі конічної та циліндричної форми можуть виготовлятися методом згинання-прокатування на трьох та чотирьохвалкових листозгинальних машинах. Згинання-прокатування має високу продуктивність, точність та стабільність, але її застосування обмежене виготовленням складних форм, розмірами робочого простору існуючого обладнання [6, 8–11].

На розтяжних-обтяжних пресах можуть виготовлятися обшивки подвійної і знакозмінної кривизни [8]. Обтяжні преси можуть оснащуватися змінними прямо- і криволінійними затискними пристроями. Розрізняють преси з горизонтальним і вертикальним розташуванням затискних губок, а також комбіновані преси з чотирма затискними пристроями та універсальні гідравлічні преси з вбудованими затискними пристроями. Основним недоліком цього способу є недостатньо високий ступінь рівномірності деформації видовження, що може призвести до утворення складок, потрібні викінчувальні роботи при виготовленні обшивок складної конфігурації, низька продуктивність, висока вартість обладнання [10].

Спосіб дробоударного формоутворення ефективно застосовується для виготовлення обшивок літальних апаратів. Його переваги полягають в меншій вартості обладнання, трудомісткості процесу в порівнянні з пресовим обладнанням, а також в підвищенні втомної міцності деталі за рахунок створення в поверхневих шарах металу напружень стискання. Основною перевагою є повна відсутність ефекту пружного відновлення вихідної форми. Кривизна деталі, одержана в процесі обробки дробом, залежить від інтенсивності струменя дробу і товщини матеріалу заготовки. Дробоударна обробка може проводитися, як з одного, так і з двох сторін заготовки при різній швидкості дробу [1].

Але, дробоударне формоутворення має ряд недоліків, основними з яких є:

- 1) дробоударне формоутворення призводить до значного підвищення шорсткості поверхні, тому після обробки обов'язково виконується додаткова операція зачищення поверхні (рис. 1, а–в);
- 2) дробомет — складне технологічне обладнання, яке швидко виходить з ладу, а саме зношення дробу,

що значно знижує стабільність процесу та прискорює зношення ротора, сопел та інших елементів;

3) при дробоструменевому формоутворенні є обмеження у виборі ефективних радіусів згинання в залежності від товщини полотна [12];

4) при бомбардуванні дробом деталі при значних швидкостях обробки виникають високі локальні температури нагріву, що можуть призвести до зміни фізико-механічних характеристик матеріалу;

5) змінення форми при експлуатації в умовах довготривалого нагріву до температури 100 °С в результаті релаксаційної зміни напруженого стану поверхневого шару деталі [9];

6) обробка дробом листів великої товщини технічно ускладнюється, можливі появлення поверхневих тріщин [8];

7) активне перенесення частинок дробу на поверхню деталі, значно знижує її корозійну стійкість, особливо матеріалів на незалізній основі;

8) змінення форми деталі після шліфувальної операції за рахунок зняття наклепаного шару матеріалу.

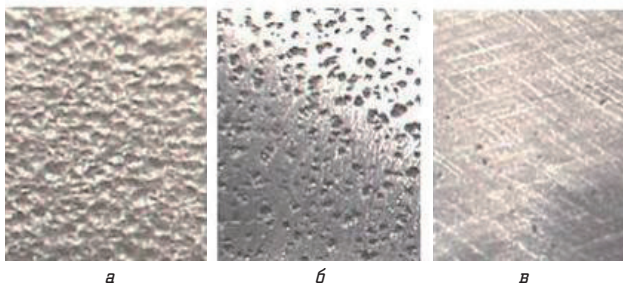


Рис. 1. Поверхні алюмінієвого сплаву Д16Т після обробки: а — дробом; б — чорнкової зачистки; в — фінішної зачистки [8]

Комбінований метод формоутворення панелей поєднує вільне згинання на гідропресі і обробку дробом. Дробоударне формоутворення при формуванні панелей подвійної кривизни застосовується, в основному, як викінчувальна операція. Основним недоліком даного методу є складність автоматизації всіх операцій при формоутворенні деталі. Також, до недоліків слід віднести і той факт, що для здійснення формоутворення потрібно велика кількість високошвидкісного обладнання: гідропрес (для формоутворення локальних підсилень), вальцювальна машина, дробометна установка з програмним керуванням, зачисні головки для оброблених дробом поверхонь [8].

Одним з новітніх методів формоутворення є лазерне термодформаційне формоутворення (ЛТФ). Даний метод за рахунок локальності процесу схожий на дробоструменеве формоутворення, але зміна форми зразка відбувається за рахунок швидкого нагрівання та охолодження поверхні металу лазерним випромінюванням (рис. 2).

Даний метод універсальний і доцільний для застосування завдяки своїм перевагам:

1) формоутворення відбувається без механічного контакту, що дає змогу не використовувати операцій фінішної обробки, а саме шліфування поверхні;

2) за рахунок чіткого дозування енергії можливе отримання форм з мінімальною похибкою;

3) має високу швидкість обробки, що значно скорочує час отримання деталі;

4) за рахунок швидкої та локальної дії лазерне випромінювання покращує фізико-механічні характеристики матеріалу;

5) швидкий температурний цикл зводить окислення поверхні до мінімуму.

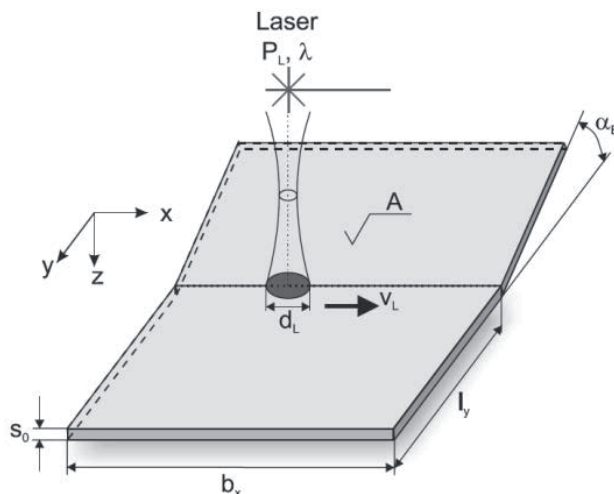


Рис. 2. Схема лазерного формоутворення за механізмом градієнта температур: параметри лазерного формоутворення: P — потужність лазерного випромінювання, λ — довжина хвилі лазерного випромінювання, A — коефіцієнт поглинання, d_L — діаметр пучка, V_L — швидкість переміщення лазерного випромінювання, s_0 — товщина зразка, b_x — ширина зразка, l_y — довжина зразка, α_b — кут згинання

За останні роки технологія лазерного формоутворення (ЛФ) швидко розвивається. В більшості роботах автори досліджували механізми і основні керуючі параметри процесу лазерного формоутворення. Для дослідження процесу ЛФ використовувались аустенітні та мартенситні сталі та інші матеріали [13–19].

Процес лазерного формоутворення алюмінієвих сплавів мало вивчений. Основною причиною недостатньої уваги до використання лазерного випромінювання для формоутворення термічно зміцнених алюмінієвих сплавів, є ймовірність погіршення механічних характеристик сплаву (твердість, міцність та інші) та низька поглинальна здатність лазерного випромінювання алюмінієвими сплавами. Більшість вчених вважає, що при нагріванні зістареного алюмінієвого сплаву Д16Т діапазоні від 200 °С до 350 °С в сплаві відбудеться процес коагуляції частинок інтерметаліду CuAl_2 , що призводить до знеміцнення матеріалу (погіршення механічних властивостей). Тому, в основному зістарені алюмінієві сплави формують у холодному стані [8].

Експериментально встановлено, що лазерна обробка знижує мікротвердість в зоні локального впливу в сплаві Д16Т, за рахунок розчинення зон ГП та порушення когерентності зв'язку метастабільних вторинних фаз [20].

Автори роботи [21] об'єднали процеси ЛФ і механічного згинання при формоутворенні конструкції з алюмінієвого сплаву Al-5005 (AMg1). Виявлено, що при ЛФ зі збільшенням кількості проходів відбувається накопичення температури, тому зменшується градієнт температури, що прямо пропорційно впливає на зменшення кута згинання. Однак, запропонований у роботі, комбінований метод формоутворення, дозволяє збільшити продуктивність згинання кута на 30 %.

В роботі [22] досліджувалися властивості алюмінієвого сплаву AA2024-T3 (Д16Т) при механічному згинанні на пресі після локальної лазерної обробки. Було підібрано режими лазерної обробки для зменшення зони локального впливу (ЗЛВ) лазерного випромінювання (без оплавлення поверхні). Дослідження мікротвердості показали, що в ЗЛВ твердість знизилася, але через 4 дні зросла. Вважається, що основною причиною зниження твердості є часткове розчинення дрібнодисперсних частинок CuAl_2 , а відновлення твердості відбулось за рахунок природного старіння алюмінієвого сплаву. М. Merklein [23] експериментально довів, що при ЛФ мікроструктура та механічні властивості алюмінієвих сплавів залежать від умов термообробки та параметрів лазерної обробки. Адаптація параметрів лазерної обробки може звести до мінімуму зменшення твердості матеріалу при лазерному формоутворенні. К. С. Chan [24] продемонстрував лазерне формоутворення композитного алюмінієвого сплаву Al6013/SiCp. Дослідив залежність кута згинання від параметрів лазерного випромінювання при ЛФ композитного матеріалу. М. F. Zaeh [25] зазначив, що лазерне формоутворення має високий потенціал для впровадження в авіаційну промисловість. Після лазерного формоутворення алюмінієвих сплавів серії 6000 було виявлено, що твердість в зоні обробки знижується до 10 %, що не значно впливає на експлуатаційні характеристики виробу (рис. 3).

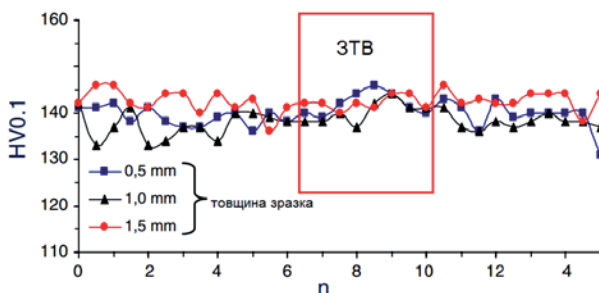


Рис. 3. Залежність мікротвердості в ЗЛВ від товщини зразка алюмінієвого сплаву 6061-T3 та кількості проходів при лазерному формоутворенні. HV — мікротвердість по Вікерсу; n — кількість проходів лазерним випромінюванням [25].

S. M. Knupfer [26] дослідив механічні зміни сплаву AA2024-T3 (Д16Т), які виникають при лазерному формоутворенні зі збільшенням щільності потужності випромінювання та кількості лазерних проходів. Виявив, що ступінь зменшення сплаву AA2024-T3 (Д16Т) залежить від глибини, на яку проходить температура в діапазоні (200–380 °С) та режиму лазерної обробки (рис. 4).

Отже, якщо застосовувати процес лазерного формоутворення термічно зміцнених алюмінієвих сплавів, то при формоутворенні алюмінієвого сплаву накопичення температури в зоні лазерної обробки може призвести до коагуляції частинок інтерметаліду. З літературних джерел відомо, що структура зістареного алюмінієвого сплаву нестабільна, і дисперсні виділення схильні до укрупнення, коагуляції. Швидкість коагуляції збільшується при збільшенні коефіцієнту дифузії. Коефіцієнт дифузії з підвищенням температури зростає по експоненті, і тому коагуляція прискорюється зі збільшенням температури [27]. Тому, для усунення ефекту акуму-

ляції температури в процесі лазерного формоутворення авторами запропоновано використовувати методи додаткового охолодження. Використання додаткового охолодження парами рідкого азоту або стисненим повітрям дасть змогу запобігти коагуляції частинок та збільшити градієнт температур, що значно покращить процес формоутворення.

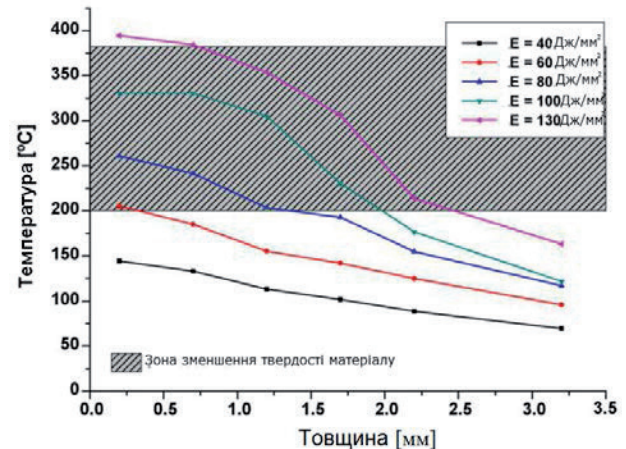


Рис. 4. Залежність температури від товщини зразка при лазерній обробці алюмінієвого сплаву AA2024-T3 (Д16Т). E — енергія лазерного випромінювання [26]

5. Напрямки подальшого дослідження

Виходячи з вищевказаного, можна стверджувати, що лазерне формоутворення доцільно використовувати для формування деталей з термічно зміцнених алюмінієвих сплавів. Однак, для повнішого обґрунтування даного твердження та розроблення технології лазерного формоутворення термічно зміцнених алюмінієвих сплавів, необхідно в подальших дослідженнях вирішити наступні задачі:

- Вивчити ефективність процесу лазерного формоутворення з додатковим охолодженням.
- Дослідити корозійну стійкість сплаву після лазерного формоутворення.
- Визначити вплив лазерного формоутворення на механічні характеристики сплаву (мікротвердість, міцність, втомну довговічність).
- Розробити метод контролю температури в зоні лазерного формоутворення деталі.
- Встановити вплив та величину залишкових напружень після лазерного формоутворення.

6. Висновки

Проаналізувавши існуючі методи формоутворення листових термічно зміцнених алюмінієвих сплавів можна зробити основні висновки:

- 1) класичні методи формоутворення листових термічно зміцнених алюмінієвих сплавів не задовольняють в повній мірі потреби виробництва;
- 2) процес лазерного формоутворення — перспективний метод, але малодосліджений;
- 3) розробка та впровадження технології лазерного формоутворення високоміцних листових алюмінієвих сплавів призведе до зменшення кількості технологічних операцій, виключення доводочних робіт, що дозволить

збільшити продуктивність процесу формоутворення деталей в авіаційній промисловості.

Література

1. Лупкин, Б. В. Формообразование дробью как метод обработки крупногабаритных деталей сложной кривизны в самолетостроении [Текст] / Б. В. Лупкин, А. И. Лагутин // *Авиационно-космическая техника и технология*. — 2006. — № 2. — С. 17–20.
2. Кириленко, А. Н. Судостроительные сплавы на основе алюминия [Текст] / А. Н. Кириленко // *Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра*. — 2010. — С. 197–203.
3. Сикульский, В. Т. Исследование процесса формообразования ребристых панелей двойной кривизны со сложной внутренней гравюрой [Текст] / В. Т. Сикульский, Ю. В. Дьяченко, Е. Е. Хитрых, И. А. Воронько // *Авиационно-космическая техника и технология*. — 2014. — № 4. — С. 14–21.
4. Сикульский, В. Т. Формообразование монолитных панелей сложных форм [Текст] / В. Т. Сикульский // *Авиационно-космическая техника и технология*. — 2013. — № 5–102. — С. 15–19.
5. Огурцов, П. С. Моделирование процесса формообразования заготовки в условиях ползучести материала на жесткой матрице в автоклаве [Текст] / П. С. Огурцов // *Электронный журнал «Труды МАИ»*. — 2011. — № 45. — С. 25–30.
6. Прошиков, А. И. Заготовительно-штамповочные работы в самолетостроении [Текст] / А. И. Прошиков, В. А. Малафеев. — М.: Машиностроение, 1976. — 439 с.
7. Белянин, П. Н. Производство широкофюзеляжных самолетов [Текст] / П. Н. Белянин. — М.: Машиностроение, 1979. — 360 с.
8. Малащенко, А. Ю. Эффективности технологического сочетания гибки-рокатки и дробеударного формообразования длинномерных обводообразующих деталей [Текст]: дис. ... канд. тех. наук / А. Ю. Малащенко. — М., 2014. — 154 с.
9. Пашков, А. Е. Автоматизированная технология комбинированного формообразования панелей самолетов [Текст] / А. Е. Пашков // *V Всероссийская конференция «Современные наукоемкие инновационные технологии»*. — 2013. — С. 453–457.
10. Горбунов, М. Н. Технология заготовительно-штамповочных работ в производстве самолетов [Текст] / М. Н. Горбунов. — М.: Машиностроение, 1981. — 224 с.
11. Мошнин, Е. И. Гибка, обтяжка и правка на прессах [Текст] / Е. И. Мошнин. — М.: Машгиз, 1959. — 254 с.
12. Лупкин, Б. В. Применение дробеударной обработки в авиационной промышленности [Текст] / Б. В. Лупкин, С. Д. Младин, А. И. Лагутин, В. А. Никитенко // *Сборник научных трудов «Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии»*. — 2007. — № 36. — С. 20–28.
13. Кагляк, О. Д. Формоутворення просторових металевих конструкцій локальним лазерним нагріванням [Текст]: дис. ... канд. тех. наук / О. Д. Кагляк. — К., 2012. — 149 с.
14. Chen, J. Modelling of Simultaneous Transformations in Steels [Electronic resource]: PhD thesis / J. Chen. — Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge England February, 2009. — Available at: \www/URL: <http://www.dspace.cam.ac.uk/handle/1810/217866>
15. Cheng, J. Microstructure Integrated Modeling of Multiscan Laser Forming [Text] / J. Cheng, Y. L. Yao // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. — 2002. — Vol. 124, № 2. — P. 379–387. doi:10.1115/1.1459088
16. Hu, Z. Computer simulation and experimental investigation of sheet metal bending using laser beam scanning [Text] / Z. Hu, M. Labudovic, H. Wang, R. Kovacevic // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. — 2001. — Vol. 41, № 4. — P. 589–607. doi:10.1016/s0890-6955(00)00058-4
17. Magee, J. Edge Effects in Laser Forming [Text] / J. Magee, K. G. Watkins, W. M. Steen // *Laser Assisted Net Shape Engineering 2, Proceedings of LANE'97*. — Meisenbach Bamberg, 1997. — P. 399–406.
18. Iordanova, I. Changes of microstructure and mechanical properties of cold-rolled low carbon steel due to its surface treatment by Nd:glass pulsed laser [Text] / I. Iordanova, V. Antonov, S. Gurkovsky // *Surface and Coatings Technology*. — 2002. — Vol. 153, № 2–3. — P. 267–275. doi:10.1016/s0257-8972(01)01668-1
19. Hennige, T. On the working accuracy of laser bending [Text] / T. Hennige, S. Holzer, F. Vollertsen, M. Geiger // *Journal of Materials Processing Technology*. — 1997. — Vol. 71, № 3. — P. 422–432. doi:10.1016/s0924-0136(97)00108-8
20. Смирнова, Н. А. Разработка и исследование процессов упрочнения поверхности алюминиевых сплавов излучением лазера [Текст]: дис. ... канд. тех. наук / Н. А. Смирнова. — М., 2000. — 222 с.
21. Roohi, A. H. External force-assisted laser forming process for gaining high bending angles [Text] / A. H. Roohi, M. H. Gollo, H. M. Naeini // *Journal of Manufacturing Processes*. — 2012. — Vol. 14, № 3. — P. 269–276. doi:10.1016/j.jmapro.2012.07.004
22. Mohammadi, A. Bending Properties of Locally Laser Heat Treated AA2024-T3 Aluminium Alloy [Text] / A. Mohammadi, H. Vanhove, A. Van Bael, J. R. Duflou // *Physics Procedia*. — 2012. — Vol. 39. — P. 257–264. doi:10.1016/j.phpro.2012.10.037
23. Geiger, M. Laser and forming technology — an idea and the way of implementation [Text] / M. Geiger, M. Merklein, M. Pitz // *Journal of Materials Processing Technology*. — 2004. — Vol. 151, № 1–3. — P. 3–11. doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.04.004
24. Chan, K. C. Laser bending of an Al6013/SiCp aluminium matrix composite sheet [Text] / K. C. Chan, J. Liang // *Journal of Materials Processing Technology*. — 2000. — Vol. 100, № 1–3. — P. 214–218. doi:10.1016/s0924-0136(99)00380-5
25. Zaeh, M. F. Development of a robust laser beam bending process for aluminum fuselage structures [Text] / M. F. Zaeh, T. Hornfeck // *Production Engineering*. — 2008. — Vol. 2, № 2. — P. 149–155. doi:10.1007/s11740-008-0100-x
26. Knupfer, S. M. The effects of laser forming on the mechanical and metallurgical properties of low carbon steel and aluminium alloy samples [Text] / S. M. Knupfer, A. J. Moore // *Materials Science and Engineering: A*. — 2010. — Vol. 527, № 16–17. — P. 4347–4359. doi:10.1016/j.msea.2010.03.069
27. Новиков, И. И. Теория термической обработки металлов [Текст] / И. И. Новиков. — М.: Металлургия, 1978. — 154 с.

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ФОРМОБРАЗОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЛИСТОВЫХ ТЕРМИЧЕСКИ УПРОЧНЕННЫХ АЛЮМИНОВЫХ СПЛАВОВ

В данной статье представлен анализ современных технологий формообразования листовых деталей из алюминиевых термически упрочненных сплавов. Определены технологические преимущества и недостатки методов формообразования деталей из листовых термически упрочненных алюминиевых сплавов. Рассмотрены особенности предложенного авторами способа лазерного формообразования деталей из листовых алюминиевых сплавов. Определены задачи исследования для дальнейшей реализации в авиационной промышленности.

Ключевые слова: лазерное формообразование, листовые материалы, изгиб, алюминий, дробеструйное формообразование.

Романов Богдан Сергійович, аспірант, кафедра лазерної техніки та фізико-технічних технологій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: b.romanov@kpi.ua.

Кагляк Олексій Дмитрович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра лазерної техніки та фізико-технічних технологій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: Kaglyak_O@meta.ua.

Лутай Анатолій Миколайович, старший викладач, кафедра лазерної техніки та фізико-технічних технологій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, **e-mail: lutay.a@yandex.ua**.

Головко Леонід Федорович, доктор технічних наук, професор, кафедра лазерної техніки та фізико-технічних технологій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, **e-mail: Leongolovko@gmail.com**.

Романов Богдан Сергеевич, аспірант, кафедра лазерної техніки та фізико-технічних технологій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Казляк Алексей Дмитриевич, кандидат технічних наук, доцент, кафедра лазерної техніки та фізико-технічних технологій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна.

Лутай Анатолій Николаевич, старший преподаватель, кафедра лазерной техники и физико-технических технологий, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Головко Леонид Федорович, доктор технических наук, профессор, кафедра лазерной техники и физико-технических технологий, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Romanov Bohdan, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, **e-mail: b.romanov@kpi.ua**.

Kaglyak Olexiy, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, **e-mail: Kaglyak_O@meta.ua**.

Lutay Anatoliy, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, **e-mail: lutay.a@yandex.ua**.

Golovko Leonid, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, **e-mail: Leongolovko@gmail.com**.