УДК 669.295.054.2:621.762.82:621.9.048.7

doi: 10.32620/aktt.2020.3.05

Е. В. ВИШНЕПОЛЬСКИЙ, Д. В. ПАВЛЕНКО

Національний університет «запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна

АЛМАЗНЕ ВИГЛАДЖУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ З НЕКОМПАКТНИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ АЛЮМІНИДІВ ТИТАНУ

Приведені результати досліджень параметрів залишкової пористості поверхневого шару зразків із сплаву Ті - 45Al-3Nb - Y2O3 (OX45 - 3ODS) на основі алюмінидів титану, отриманих селективним лазерним спіканням, з точки зору впливу на параметри залишкової пористості алмазного вигладжування з різними режимами і умовами. На підставі результатів дисперсійного аналізу виконана оцінка впливу режимів алмазного вигладжування і ефектів їх парної взаємодії на параметри пористості поверхневого шару. Встановлені закономірності зміни параметрів порового простору поверхневого шару зразків (площі, периметра, ексцентриситету і фрактальної розмірності меж пір) від подачі, зусилля на вигладжувач і його радіусу. Визначено, що для результативного застосування встановлених режимів необхідно враховувати початкову пористість, яка має випадковий розподіл по площині поверхні досліджуваних зразків. Виконано кореляційний аналіз та за допомогою діаграми Парето визначено величину впливу режимів алмазного вигладжування на залишкову пористість. Виконана оцінка адекватності та однорідності математичної моделі на основі критеріїв Фішера та Кохрена. Визначені критерії оптимізації режимів вигладжування і обмеження режимних параметрів. Виконана оптимізація режимів вигладжування методом крутого сходження. Встановлені оптимальні режимні параметри обробки, з точки зору досягнення мінімальної залишкової пористості в поверхневому шарі. Визначені технологічні обмеження при використанні алмазного вигладжування для зміцнення малопластичних некомпактних матеріалів. Показані перспективи подальших досліджень необхідних для практичного застосування технології вигладжування матеріалів на основі алюмінидів титану.

Ключові слова: титановий сплав; алюміниди титана; селективне лазерне спікання; алмазне вигладжування; режими; подання; зусилля; радіус; поверхневий шар; пористість; оптимізація.

Вступ

Постійна конкурентна боротьба у сфері авіаційної і космічної техніки вимагає безперервної розробки виробів з усе більш високими технічними характеристиками при мінімально можливій собівартості.

Забезпечити виконання таких суперечливих вимог допоможе застосування некомпактних матеріалів. До них відносять спечені сплави, які отримують методами порошкової металургії [1, 2] і сплави, що отримуються шляхом селективного лазерного спікання [3, 4]. Основними перевагами цих технологій є: створення матеріалів які неможливо отримати іншими способами; можливість створення матеріалів із заданими властивостями; отримання заготівок за формою близьких до готової деталі, що істотно знижує витрати на подальшу обробку [5]. Ці технології дозволяють отримувати дрібносерійні партії сплавів різного хімічного складу, псевдосплави, сплави з пам'яттю форми [6], гармонійні матеріали [7], а також матеріали з найменшим змістом домішок, точною відповідністю хімічному складу, порівняно з литими сплавами, за рахунок застосування чистих порошків [8]. Низька питома вага таких матеріалів сприяє зниженню маси конструкцій.

Нині авіаційна промисловість починає активно освоювати застосування принципово нового класу матеріалів - некомпактних сплавів на основі алюмінидів титану. Низька щільність алюмінидів титану виводить їх на один рівень з суперсплавами на основі нікелю. Сплави на основі алюмінидів титану характеризуються високими механічними властивостями такими як висока міцність, жорсткість і хороша повзучість, високий опір корозії і окисленню [9, 10].

Застосування адитивних технологій і порошкової металургії, дозволяють отримувати просторовоскладні заготовки деталей машин, що містять велику кількість конструктивних концентраторів напруги таких як отвори, галтелі, різні виточки, отвори малого діаметру і великої довжини і так далі (рис. 1).

Проте при усіх перевагах порошкова металургія і адитивні технології мають деякі істотні недоліки, які перешкоджають використанню цих технологій в машинобудуванні для виробництва відповідальних деталей, працюючих при високих навантаженнях. До цих недоліків відноситься: висока вартість порошків; необхідність застосування чистих порошків з мінімальною кількістю домішок; необхідність для виробництва деталей захисної атмосфери; рівноміцність і як наслідок висока чутливість до концентрації напруги.



Рис. 1. Заготівлі деталей машин, отримані шляхом синтезу з порошків [11]

Одним з головних недоліків порошкової металургії і адитивних технологій є залишкова пористість, яка сприяє зниженню міцності, пластичності, в'язкості руйнування, тріщиностійкості, оброблюваності різанням, а також триботехнічних характеристик [12].

На усунення недоліків адитивних технологій спрямовані роботи багатьох вітчизняних і закордонних дослідників. Використання оксидно-дисперсійних зміцнених порошків дозволяє значно понизити залишкову пористість [13]. На етапі синтезу деталі за допомогою варіювання режимів друку можна управляти величиною пористості від серцевини зразка до його поверхні [14], але ця методика не застосовна для високонавантажених відповідальних деталей і значно ускладнює процес друку оскільки вимагає пошуку законів, по яких ця пористість буде зміняться. Використання мілкодисперстних порошків дозволяє значно понизити величину залишкової пористості [15], проте це у свою чергу, значно підвищує їх вартість.

Високу вартість сферичного порошку титану можна понизити застосуванням несферичного дегідрованого порошку титану, який, за деякими показниками, перевершує сферичний [16], проте це знижує міцностні характеристики матеріалу. Також для промислового застосування необхідно розв'язати проблему розподілу цього порошку в обмеженому об'ємі.

Одним з ефективних методів зниження залишкової пористості є гаряче ізостатичне пресування, проте воно має високу вартість і застосовано тільки для матеріалу який має внутрішні піри [17 – 19]. Новим і багатообіцяючим методом зниження залишкової пористості є пластична деформація за допомогою гвинтової екструзії, яка дозволяє понизити пористість по усьому перерізу напівфабрикату [20 – 22]. У роботі [23] показано, що при інтенсивній пластичній деформації некомпактних матеріалів методом гвинтової екструзії усунення пористості також сприяє підвищенню міцності заготівки. Але усі технології інтенсивної пластичної деформації некомпактних матеріалів покращують якість напівфабрикатів, форма яких далека від форми заготівок, що отримуються традиційними методами, і в результаті їм потрібна тривала подальша обробка.

Не вирішеними на сьогодні завданнями при виробництві деталей, отриманих шляхом синтезу з порошків титану як адитивними технологіями, так і порошковою металургією, є обмеження при виробництві великогабаритних деталей, значне зниження механічних властивостей за наявності в їх конструкції конструктивних концентраторів напружень, а також низькі триботехнічні характеристики поверхневого шару. Рішення вказаних завдань можливо шляхом оптимізації форми і геометрії конструктивних концентраторів напружень і їх зміцнення за допомогою локального поверхнево пластичної деформації (ППЦ).

Враховуючи що найбільш навантаженими елементами будь-якої деталі є конструктивні концентратори напружень малих розмірів, а також те, що вони часто є місцями появи тріщин, одній з перспективних технологій зміцнюючої обробки що дозволяє вирішити вказані вище проблеми являється алмазне вигладжування (AB) [24 – 27]. Порівняно з іншими методами локальної поверхнево-пластичної деформації АВ має ряд істотних переваг таких як: можливість обробляти конструктивні концентратори напружень на деталях різних типорозмірів і форми; невелика величина деформуючого елементу дозволяє створювати в зоні контакту з деталлю великий питомий тиск, що у свою чергу дозволить обробляти тонкостінні деталі і не приведе до їх деформації; дозволяє отримати високу шорсткість і навести в поверхневому шарі стискуючі залишкові напруження.

Низька пластичність одночасно з високою твердістю сплавів на основі алюмінидів титану приводить до того що цей матеріал має підвищену крихкість, цю проблему вирішують, різними способами: оптимізують режими обробки [28, 29], підвищують пластичність і знижують температуру в зоні різання, застосовуючи щедре охолодження [30].

Аналіз показує, що на сьогодні завдання зниження залишкової пористості і підвищення якості поверхневого шару деталей з некомпактних алюмінидів титану отриманих методами порошкової металургії і адитивними технологіями є актуальними.

Метою роботи є визначення оптимальних режимів алмазного вигладжування поверхневого шару деталей із сплавів на основі алюмінидів титану отриманих методом селективного лазерного спікання за критерієм отримання мінімальної залишкової пористості. Для досягнення мети були вирішені завдання, пов'язані з вибором методу зміцнення і геометричних параметрів інструменту; дослідженням впливу режимних параметрів зміцнення на залишкову пористість, створення математичних моделей для прогнозування оптимальних режимів обробки, перевірка адекватності отриманих моделей і оптимізації режимів вигладжування.

Матеріали і методи досліджень

Об'єктом дослідження є режими алмазного вигладжування сплаву на основі алюміниду титана Ті - 45Al-3Nb - Y2O3, отриманого за технологією селективного лазерного спікання порошку. Предметом дослідження були залежності зміни параметрів порового простору від параметрів алмазного вигладжування плоских зразків, отриманих за вказаною вище технологією

Досліджуваний сплав має низьку щільність одночасно з високою теплостійкістю і унікальними механічними властивостями, що у свою чергу затребуване в сучасному авіа- і машинобудуванні. Сплав є алюмінидом титану Ті - 45Al-3Nb - Y2O3 зміцнений дисперсними оксидними частками ітрію з метою зменшення залишкового порового простору, підвищення жароміцності, низькотемпературної пластичності і уповільнення дифузійних процесів на межах зерен при робочій температурі деталі.

Для досліджень використали стандартні вигладжувачі з радіусом сфери алмазу (Rsf) 1,0 мм, 2,5 мм і 4 мм. Враховуючи відсутність інформації про режими вигладжування дослідженого сплаву, при виборі діапазонів режимів обробки керувалися даними, отриманими раніше для традиційних компактних матеріалів [31]. Обробка виконувалася із зусиллям вигладжування (F) 0,1; 0,3; 0,4кН; з подачею (S) 0,05; 0,1; 0,15мм/об, початкова пористість (Pr) варіювалася від 0,1 до 0,246 (таблиця 1).

Зразки обробляли на універсальному вертикально-фрезерному верстаті JAROCIN FWD321. Вигладжували ділянки шириною 6 мм завдовжки 10 мм на одному зразку.

Пористість зразків визначали шляхом аналізу мікрофотографій металографічних шліфів зразків по ГОСТ 9391-80. Мікрошліфи виготовлялися за стандартною методикою. При аналізі мікрофотографій поверхні шліфа використали програму аналізу зображень Іmage Pro Plus (рис. 3). Для об'єктивної оцінки окрім залишкової пористості необхідно також враховувати вплив загального периметра пір, ексцентриситету і фрактальної розмірності меж пір.

Параметр П (пористість) дозволить визначити загальну пористість в поперечному перерізі зразка; е (ексцентриситет) дасть можливість оцінити, як впливають параметри обробки на витягнутість пір; Р (периметр) дає уявлення про зміну довжини контуру пори відносно різних режимів зміцнення; у свою чергу оцінка D (фрактальна розмірність) дозволить визначити, наскільки контур пори можна описати елементарними елементами, що повторюються (рис. 2).

Таблиця 1

Режими алмазного вигладжування зразків з некомпактного сплаву Ті - 45Al-3Nb - Y2O3

N⁰	F(ĸH)	S(мм/о)	S(мм/o) Rsf(мм)	
1	0,1	0,05 1		0,246
2	0,1	0,05	2,5	0,1233
3	0,1	0,05	4	0,1866
4	0,1	0,1	1	0,13
5	0,1	0,1	2,5	0,1833
6	0,1	0,1	4	0,1666
7	0,1	0,15	1	0,1
8	0,1	0,15	2,5	0,13
9	0,1	0,15	4	0,11
10	0,3	0,05	1	0,1166
11	0,3	0,05	2,5	0,152
12	0,3	0,05	4	0,1
13	0,3	0,1	1	0,1
14	0,3	0,1	2,5	0,11
15	0,3	0,1	4	0,16
16	0,3	0,15	1	0,13
17	0,3	0,15	2,5	0,11
18	0,3	0,15	4	0,15
19	0,4	0,05	1	0,1
20	0,4	0,05	2,5	0,15
21	0,4	0,05	4	0,16
22	0,4	0,1	1	0,11
23	0,4	0,1	2,5	0,13
24	0,4	0,1	4	0,1
25	0,4	0,15	1	0,15
26	0,4	0,15	2,5	0,12
27	0,4	0,15	4	0,18



Рис. 2. Схема виміру параметрів порового простору: а - П; би - е; у - Р; г - D

Статистичну обробку виконували в програмі STATISTICA.

Результати досліджень і їх аналіз

Сплаву Ті - 45Al-3Nb - Y2O3 є некомпактним матеріалом, середня пористість якого складає 15 % (рис. 3, а). На поверхні зразків були присутніми відкриті, тупикові пори, величина яких досягала 0,25 мм. Їх наявність і хаотичний розподіл значно ускладнює процес зміцнення деталі. Застосування алмазних вигладжувачів малих радіусів може привести до того, що інструмент провалюватиметься в пори і замість пластичної деформації буде відбуватися мікрорізання. Внаслідок нерівномірного розподілу тупикових пір в точці контакту інструменту з поверхнею обробки виникатимуть різні умови деформації, оскільки обробка відбувається за пружною схемою.



Рис. 3. Поверхні і поверхневий шар зразків зміцнених з різними режимами: а –без зміцнення;

г

- б режим зміцнення №3 (таблиця 1);
- в режим зміцнення №11 (таблиця 1);
- г режим зміцнення №14 (таблиця 1)

Велика кількість пір знаходиться на поверхні зразка (рис. 3, а), що підтверджує висловлене раніше припущення про те, що локальне зміцнення поверхневого шару місць концентрації напружень допоможе розширити діапазон застосування деталей, отриманих методами порошкової металургії і адитивними технологіями. Пори мають круглу форму, утворюють на поверхні "рвані" краї, які можуть бути місцями появи тріщин.

Аналіз мікрофотографій зразків (рис. 3), зміцнених з різними режимами, підтверджує зроблені раніше припущення. Так, наприклад, обробка по режимах № 3 і № 11 підтверджують припущення про те, що невдале поєднання режимних параметрів може привести до розтріскування поверхні зміцнення (рис. 3, б і рис. 3, в), у свою чергу їх оптимальне поєднання (рис. 3, г) режим № 14 значно знижує залишкову пористість поверхні і поверхневого шару.

Для оцінки взаємозв'язку між параметрами залишкової пористості виконали кореляційний аналіз. У зв'язку з тим, що розподіл пір на поверхні зразка випадковий, то залишкова пористість після вигладжування не підкоряється закону нормального розподілу. Це призвело до необхідності використання коефіцієнта рангової кореляції Спірмена (табл. 2).

Таблиця 2

16		••
Матриц	я парних	корелянии
пагриц	n mapmin	Roperniqui

Пара- метри	П	D	Р	e
П	1	0,46	0,83	0,57
D	0,46	1	0,45	0,327
Р	0,83	0,45	1	0,887
e	0,57	0,32	0,88	1

Примітка: жирним шрифтів виділені статистично значимі значення для вірогідності 50 %

Встановлено, що усі досліджувані параметри залишкової пористості мають сильний взаємозв'язок (таблиця 2). У зв'язку з цим подальшу оптимізацію режимів зміцнення виконували на підставі вивчення пористості П.

Дисперсійний аналіз результатів експерименту дозволив встановити вплив режимів вигладжування і їх взаємодій на пористість поверхневого шару (рис. 4).

Встановлено, що найбільший вплив має подача і сила вигладжування.

Для оптимізації режимів вигладжування використали регресійне рівняння, отримане на підставі обробки результатів повнофакторного експерименту. В якості незалежних змінних (чинників) вибрані режимні параметри процесу зміцнення (див. табл. 1).





В якості функції відгуку - площа пір. Регресійне рівняння має вигляд:

$$\begin{split} \Pi &= 0,2470 - 0,0993 \times R + 3,4221 \times F^2 + \\ +15,6379 \times S^2 - 16,7781 \times Pr^2 - 35,0152 \times F \times S + \\ +0,6473 \times F \times R + 0.7207 \times R \times Pr - \\ -0,4212 \times F \times S \times R - 3,4225 \times F \times R \times Pr + \\ +72,4673 \times F^2 \times S - 0,0345 \times R^2 \times F - \\ -77,7389 \times F^2 \times Pr + 181,9598 \times F \times Pr^2, \end{split}$$

де F – зусилля вигладжування, кН;

S – подання вигладжування, мм/о;

Pr – початковий поровий простір %;

R – радіус сфери алмазного вигладжувача, мм

Адекватність моделі оцінювали за критерієм Фішера. Для визначення дисперсії відтворюваності виконували дублювання 11-ти дослідів в центрі плану експерименту (таблиця 3). Її однорідність оцінювали за критерієм Кохрена.

Табличне значення критерію Фишера при рівні значущості 0,05 (Р=95 %), числі ступенів свободи дисперсії адекватності і дисперсії відтворюваності рівним 10 складає $\Phi_{0,05;10;10}^{\text{табл}} = 2,98$ [2]. Розрахункове значення критерію Фишера склало $\Phi_{0,05;10;10}^{\text{табл}} = 2,54$. Враховуючи, що $\Phi^{\text{расч}} < \Phi^{\text{табл}}$ отриману регресійну модель (1) можна рахувати адекватно тієї, що описує площу пір після алмазного вигладжування від режиму.

Встановлено, що залежності залишкової пористості поверхневого шару від зусилля і подачі вигладжування для різних радіусів вигладжувача мають екстремальний характер (рис. 5).

Таблиця 3 Оцінка дисперсії відтворюваності регресійної моделі

N⁰	F, кН	S мм/о	Rинд мм	Pr %	$A_{\varphi}^{ m эксп}$	A^{pacy}_{ϕ}
1	0,15	0,07	1,5	0,123	0,125	0,108
2	0,15	0,10	2,5	0,245	0,359	0,395
3	0,15	0,13	2,0	0,151	0,162	0,114
4	0,20	0,07	2,5	0,146	0,178	0,168
5	0,20	0,10	2,0	0,136	0,142	0,095
6	0,20	0,13	1,5	0,172	0,179	0,183
7	0,25	0,07	2,0	0,165	0,237	0,253
8	0,25	0,10	1,5	0,124	0,144	0,067
9	0,25	0,13	2,5	0,183	0,227	0,255
10	0,22	0,12	3,0	0,151	0,136	0,110
11	0,18	0,25	2,5	0,171	0,208	0,213

Раціональним поєднанням режимних параметрів, як показано на рисунку 5, буде вигладжування із 0.2 ... 0.3 кН, зусиллям при подачі 0,12 ... 0,15 мм/об. Мінімальні значення залишкової пористості можна отримати при використанні вигладжувача радіусом 1 мм (рис. 5, а), проте як вже говорилося вище його застосування призводить до розтріскування поверхні. З вище сказаного витікає, що раціональним радіусом вигладжувача буде 2,5 мм (рис. 5, б). Застосування вигладжувача радіусом 4 мм (рис. 5, в) призводить до значного збільшення питомого контактного тиску, що може привести до деформації при обробці тонкостінної деталi.

На практиці необхідно підбирати радіус сфери алмазного вигладжувача виходячи з можливих геометричних обмежень при зміцненні конструктивних концентраторів напружень і величини початкової пористості. І як наслідок необхідно коригувати режими зміцнення виходячи з необхідного радіусу сфери алмазного вигладжувача.

Для знаходження оптимальних режимів вигладжування, що забезпечують мінімальну залишкову пористість, виконали оцінку поверхні відгуку, побудованої на підставі нелінійної регресійної моделі. Оцінка виконувалася по методу крутого сходження Бокса-Уілсона (таблиця 4).

Враховуючи можливі конструкційні обмеження реальних тонкостінних деталей оптимальним алмазним вигладжувачем для забезпечення найкращого результату, буде 2,5 мм. Оптимальним зусиллям вигладжування буде 0,22 ... 0,3 кН. Оптимальною подачею буде 0,1 мм/об, проте цей параметр може змінюватись залежно від використовуваного устаткування, в цьому випадку потрібно брати максимально близьке, до встановленого, значення.







Рис. 5. Вплив зусилля і подачі на пористість при обробці різними вигладжувачами: a – Rsf = 1 мм; б – Rsf = 2,5 мм; в – Rsf = 4 мм

Таблиця 4 Оптимальні режими отримані на підставі аналізу поверхні відгуку по методу крутого сходження Бокса-Уілсона.

Чин- ник	Спостере жуваний мінімум	Опти мальні значення	Спостере жуваний максимум		
Площа залишкових пір, П, %					
F, кН	0,10	0,21	0,40		
S, мм/о	0,05	0,11	0,15		
Rsf, мм	1,00	4,60	4,00		

Висновки

Досліджені параметри пористості зразків із сплавів на основі алюміниду титану після алмазного вигладжування з різними режимами і умовами. Найбільш значимим параметром є залишкова пористість П.

Встановлено, що зміцнення вигладжувачем Rsf = 1 мм викликає розтріскування поверхні зразка.

Встановлено, що на залишкову пористість П, великий вплив робить початкова пористість Pr, її розподіл носить випадковий характер і може мінятися в значних межах.

На підставі аналізу статистичних даних отримано регресійне рівняння з перебором взаємодій параметрів (зусилля вигладжування F, подачі S, радіусу сфери алмазного вигладжувача Rsf), що описують сукупний вплив досліджуваних чинників на залишкову пористість.

Виконана перевірка адекватності нелінійної регресійної моделі, на підставі критерію Фишера.

Виконана оптимізація режимних параметрів по методу крутого сходження Бокса-Уілсона. Встановлено, що найбільш раціональними режимними параметрами алмазного вигладжування поверхні зразка початкова пористість якого складає 15 %, з точки зору економічно доцільної залишкової пористості, є вигладжування із зусиллям 0,3 кН, подачею 0,1 мм/об, алмазним вигладжувачем радіусом 2,5 мм.

Перспективою подальших досліджень є перевірка наскільки встановлені залежності справедливі для інших некомпактних сплавів. Для практичного застосування технології вигладжування матеріалів на основі алюмінидів титану потрібна розробка загальної математичної моделі, яка максимально точно описувала б вибір раціональних параметрів для групи з декількох сплавів на основі алюмінидів титану.

Література

1. Angelo, P. C. Powder metallurgy: science, technology and applications [Text] / P. C. Angelo, R. Subramanian. – New Delhi : PHI Learning Private Limited, 2009. – 302 p.

2. The technologies of titanium powder metallurgy [Text] / F. H. Froes, S. J. Mashl, J. C. Hebeisen, et al. // The journal of the minerals, metals & materials society. – 2004. – vol. 56, issue 11. – P. 46–48. DOI: 10.1007/s11837-004-0252-x.

3. Direct selective laser sintering of metals [Text] / M. Agarwala, D. Bourell, J. Beaman, H. Marcus, J. Barlow // Rapid prototyping journal. – 1995. – vol. 1, issue 1. – P. 26-36. DOI: 10.1108/13552549510078113.

4. Kumar, S. Selective laser sintering: A qualitative and objective approach [Text] / S. Kumar // The journal of the minerals, metals & materials society. – 2003. – vol. 55, issue 10. – P. 43–47. DOI: 10.1007/s11837-003-0175-y.

5. Orban, R. L. New research directions in powder metallurgy [Text] / R. L. Orban // Romanian reports in physics. – 2004. – vol. 56, no. 3. – P. 505–516.

6. Lexcellent, C. Shape-memory alloys handbook. [Text] / C. Lexcellent. – Hoboken : Wiley, 2013. – 408 p.

7. Effect of harmonic structure design with bimodal grain size distribution on near-threshold fatigue crack propagation in Ti–6Al–4V alloy [Text] / S. Kikuchi, T. Imai, H. Kubozono et al. // International journal of fatigue. – 2016. – vol. 92. – P. 616–622.

8. Pavlenko, D. V. Assessment of gas saturation of titanium alloys synthesized from powders using twist extrusion [Text] / D. V. Pavlenko // Powder metallurgy and metal ceramics. – 2017. – vol. 56, issue 5–6. – P. 273 – 282. DOI: 10.1007/s11106-017-9895-3.

9. Titanium aluminides for aerospace and automotive applications processed by electron beam melting: contribution of politecnico di torino [Text] / G. Baudana, S. Biamino, D. Ugues et al. // Metal powder report. – 2016. – vol. 71, issue 3. – P. 193-199.

10. Pollock, T. M. Alloy design for aircraft engines [Text] / T. M. Pollock // Nature materials. – 2016. – vol. 15. – P. 809-815. DOI: /10.1038/nmat4709.

11. Belova, O. V. Prospects of application of additive technologies for increasing the efficiency of impeller machines [Text] / O. V. Belova, Yu. F. Borisov // AIP Conference proceedings. – 2017. – vol. 1876. – P. 1-7. DOI: 10.1063/1.4998856.

12. Synthesis of alloy Ti - 6Al - 4V with low residual porosity by a powder metallurgy method [Text] / O. M. Ivasishin, D. G. Savvakin, F. H. Froes et al. // Powder metallurgy and metal ceramics. -2002. - vol. 41, no. 7-8. - P. 382 - 390. DOI:10.1023/A:1021117126537.

13. Microstructure and oxide particle stability in a novel ODS γ-TiAl alloy processed by spark plasma sintering and laser additive manufacturing. [Text] / C. Kenel, K. Dawson, J. Barras et al. // Intermetallics. – 2017. – vol. 90. – P. 63-73. DOI: 10.1016/j.intermet.2017.07.004.

14. Additive manufacturing technology (direct metal laser sintering) as a novel approach to fabricate functionally graded titanium implants: preliminary investigation of fabrication parameters [Text] / W. S. Lin, T. L. Starr, B. T. Harris et al. // The international journal of oral & maxillofacial implants. – 2013. – vol. 28, no. 6. – P. 1490-1495. DOI: 10.11607/jomi.3164.

15. Rapidly solidified titanium aluminide-based composite deposits with dispersed nitride particles produced by reactive plasma spraying [Text] / Y. Hoshiyama, H. Miyake, K. Murakami et al. // Journal of the Japan Institute of Metals. – 2002. – vol. 66. – P. 784-791. DOI: 10.2320 /jinstmet1952.66.7_784.

16. McCracken, C. G. Key characteristics of hydride – dehydride titanium powder [Text] / C. G. McCracken, D. P. Barbis, R. C. Deeter // Powder Metallurgy. – 2011. – vol. 54, iss. 3. – P. 180-183. DOI: 10.1179/174329011X13045076771849.

17. Titanium-aluminides by hot isostatic pressing of cold extruded titanium-aluminium powder mixtures [Text] / M. Dahms, J. Seeger, W. Smarsly, B. Wildhag // ISIJ International. – 1991. – vol. 31, no. 10. – P. 1093-1099.

18. Kothari, K. Advances in gamma titanium aluminides and their manufacturing techniques [Text] / K. Kothari, R. Radhakrishnan, N. M. Wereley // Progress in Aerospace Sciences. – 2012. – vol. 55. – P. 1– 16.

19. Ran, G. The effect of hot isostatic pressing on the microstructure and tensile properties of an unmodified A356-T6 cast aluminum alloy [Text] / G. Ran, J. Zhou, Q. G. Wang, // Journal of alloys and compounds. – 2006. – vol. 421. – P. 80–86.

20. Appel, F. Novel design concepts for gammabase titanium aluminide alloys [Text] / F. Appel, M. Oehring, R. Wagner // Intermetallics. – 2000. – vol. 8. – P. 1283 – 1312.

21. Beygelzimer, Y. Vortices and mixing in metals during severe plastic deformation [Text] / Y. Beygelzimer // Materials science forum. – 2011. – vol. 683. – P. 213-224. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.683.213.

22. Lapovok, R. Low-temperature compaction of Ti-6Al-4V powder using equal channel angular extrusion with back pressure. [Text] / R. Lapovok, D. Tomus, B. C. Muddle // Materials science and engineering: A. – 2008. – vol. 490, Issues 1–2. – P. 171-180. DOI: /10.1016/j.msea.2008.01.075.

23. Refinement of Microstructure and Mechanical Properties of Titanium Processed by Twist Extrusion and Subsequent Rolling [Text] / V. V. Stolyarov, Ya. E. Beigel'zimer, D. V. Orlov, R. Z. Valiev // The physics of metals and metallography. – 2005. – vol. 99, no. 2. – P. 204 – 211.

24. Bobrovskij, I. N. Burnishing Systems: a Short Survey of the State-of-the-art [Text] / I. N. Bobrovskij // IOP Conf. Series: Materials science and engineering. – 2018. – vol. 302. – P. 1-6. DOI: 10.1088/1757-899X/302/1/012041.

50

25. Nazarova, M. N. Diagnostics and repair of centrifugal oil transfer pump rotor shaft. [Text] / M. N. Nazarova, A. G. Palaev // IOP Conf. Series: Earth and environmental science 87. – 2017. – vol. 87, Issue 9. – P. 1-7. DOI: 10.1088/1755-1315/87/9/092016.

26. Five-axis machining and burnishing of complex parts for the improvement of surface roughness [Text] / N. Luis, L. Lacalle, A. Rodríguez et al. // Materials and manufacturing processes. – 2011. – vol. 26, Issue 8.

- P. 997-1003. DOI: 10.1080/10426914. 2010.529589. 27. Akkurt, A. Comparison of roller burnishing

method with other hole surface finishing processes applied on AISI 304 austenitic stainless steel [Text] / A. Akkurt // Journal of materials engineering and performance. – 2011. – vol. 20, Issue 6. – P. 960-968. DOI: 10.1007/s11665-010-9718-x.

28. Mantle, A. L. Surface integrity of a high speed milled gamma titanium aluminide [Text] / A. L. Mantle, D. K. Aspinwall // Journal of materials processing technology. – 2001. – vol. 118, issues 1-3. – P. 143-150. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00914-1.

29. On high-speed turning of a third-generation gamma titanium aluminide [Text] / F. Klocke, D. Lung, M. Arft et al. // The international journal of advanced manufacturing technology. – 2013. – vol. 65, issue 1-4. – P. 155-163. DOI: 10.1007/s00170-012-4157-5.

30. Milling and turning of titanium aluminides by using minimum quantity lubrication [Text] / P. C. Priarone, M. Robiglio, L. Settineri, V. Tebaldo // Procedia CIRP. – 2014. – vol. 24. – P. 62-67. DOI: 10.1016/j.procir.2014.07.147.

31. Вишнепольский, Е. В. Повышение сопротивления усталости мест концентрации напряжений в цилиндрических оболочках алмазным выглаживанием [Текст] / Е. В. Вишнепольский, Г. В. Пухальская, И. Л. Гликсон // Вісник двигунобудування. – 2009. – № 1. – С. 90 – 94.

References

1. Angelo, P. C., Subramanian, R. *Powder Metallurgy: Science, Technology and Applications.* Delhi, PHI Learning private limited Publ., 2009. 312 p.

2. Froes, F. H., Mashl, S. J., Hebeisen, J. C. et al. The technologies of titanium powder metallurgy. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society,* 2004, vol. 56, issue 11, pp. 46-48. DOI: 10.1007/s11837-004-0252-x.

3. Agarwala, M., Bourell, D., Beaman, J. et al. Direct selective laser sintering of metals. *Rapid Proto-typing Journal*, 1995, vol. 1, issue 1, pp. 26-36. DOI: 10.1108/13552549510078113.

4. Kumar, S. Selective laser sintering: A qualitative and objective approach. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 2003, vol. 55, issue 10, pp. 43-47. DOI: 10.1007/s11837-003-0175-y. 5. Orban, R. L. New research directions in powder metallurgy. *Romanian Reports in Physics*, 2004, vol. 56, no. 3, pp. 505-516.

6. Lexcellent, C. *Shape-Memory Alloys Handbook*. Hoboken, Wiley Publ., 2013. 408 p.

7. Kikuchi, S., Imai, T., Kubozono, H. et al. Effect of harmonic structure design with bimodal grain size distribution on near-threshold fatigue crack propagation in Ti–6Al–4V alloy. *International Journal of Fatigue*, 2016, vol. 92, pp. 616–622.

8. Pavlenko, D. V. Assessment of gas saturation of titanium alloys synthesized from powders using twist extrusion. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2017, vol. 56, issue 5-6, pp. 273 – 282. DOI: 10.1007/s11106-017-9895-3.

9. Baudana, G., Biamino, S., Ugues, D. et al. Titanium aluminides for aerospace and automotive applications processed by electron beam melting: Contribution of Politecnico di Torino. *Metal Powder Report*, 2016, vol. 71, issue 3, pp. 193-199.

10. Pollock, T. M. Alloy design for aircraft engines. *Nature Materials*, 2016, vol. 15, pp. 809-815. DOI: 10.1038/nmat4709.

11. Belova, O. V., Borisov, Yu. F. Prospects of application of additive technologies for increasing the efficiency of impeller machines. *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1876, pp. 1-7. DOI: 10.1063/1.4998856.

12. Ivasishin, O. M., Savvakin, D. G., Froes, F. et al., Synthesis of alloy ti - 6al - 4v with low residual porosity by a powder metallurgy method. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2002, vol. 41, no. 7-8, pp. 382-390. DOI: 10.1023/A:1021117126537.

13. Kenel, C., Dawson, K., Barras, J. et al. Microstructure and oxide particle stability in a novel ODS γ -TiAl alloy processed by spark plasma sintering and laser additive manufacturing. *Intermetallics*, 2017, vol. 90, pp. 63-73. DOI: 10.1016/j.intermet.2017.07.004.

14. Lin, W. S., Starr, T. L., Harris, B. T. et al. Additive manufacturing technology (direct metal laser sintering) as a novel approach to fabricate functionally graded titanium implants: preliminary investigation of fabrication parameters. *The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 2013, vol. 28, no. 6, pp. 1490-1495. DOI: 10.11607/jomi.3164.

15. Hoshiyama, Y., Miyake, H., Murakami, K. et al. Rapidly solidified titanium aluminide-based composite deposits with dispersed nitride particles produced by reactive plasma spraying. *Journal of the Japan Institute of Metals*, 2002, vol. 66, pp. 784-791. DOI: 10.2320/jinstmet1952.66.7_784.

16. McCracken, C. G., Barbis, D. P., Deeter, R. C. Key characteristics of hydride – dehydride titanium powder. *Powder Metallurgy*, 2011, vol. 54, iss. 3, pp. 180-183. DOI: 10.1179/174329011X1304507 6771849.

17. Dahms, M., Seeger, J., Smarsly, W. Wildhag, B., Titanium-aluminides by hot isostatic pressing of cold extruded titanium-aluminium powder mixtures. *ISIJ International*, 1991, vol. 31, no. 10, pp. 1093-1099.

18. Kothari, K., Radhakrishnan, R., Wereley, N. M. Advances in gamma titanium aluminides and their manufacturing techniques. *Progress in Aerospace Sciences*, 2012, vol. 55, pp. 1-16.

19. Ran, G., Zhou, J., Wang, Q. G. The effect of hot isostatic pressing on the microstructure and tensile properties of an unmodified A356-T6 cast aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006, vol. 421, pp. 80-86.

20. Appel, F., Oehring, M., Wagner, R. Novel design concepts for gamma-base titanium aluminide alloys. *Intermetallics*, 2000, vol. 8, pp. 1283-1312.

21. Beygelzimer, Y. Vortices and mixing in metals during severe plastic deformation. *Materials Science Forum*, 2011, vol. 683, pp. 213-224. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.683.213.

22. Lapovok, R., Tomus, D., Muddle B. C. Lowtemperature compaction of Ti–6Al–4V powder using equal channel angular extrusion with back pressure. *Materials Science and Engineering: A, 2008*, vol. 490, issues 1-2, pp. 171-180. DOI: /10.1016/j.msea.200801.075.

23. Stolyarov, V. V., Beigel'zimer, Ya. E., Orlov D. V., Valiev, R. Z. Refinement of microstructure and mechanical properties of titanium processed by twist extrusion and subsequent rolling. *The Physics of Metals and Metallography*, 2005, vol. 99, no. 2, pp. 204-211.

24. Bobrovskij, I. N. Burnishing Systems: a Short Survey of the State-of-the-art. *IOP Conf. Series: Materials science and engineering.* Samara, 2018, vol. 302, pp. 1-6. DOI: 10.1088/1757-899X/302/1/012041.

25. Nazarova, M. N., Palaev, A. G. Diagnostics and repair of centrifugal oil transfer pump rotor shaft. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 87, 2017, vol. 87, issue 9, pp. 1-6. DOI: 10.1088/1755-1315/87/9/092016.

26. López de Lacalle, L. N., Rodríguez, A. et al. Five-axis machining and burnishing of complex parts for the improvement of surface roughness. *Materials and Manufacturing Processes*, 2011, vol. 26, issue 8, pp. 997-1003. DOI: /10.1080/10426914.2010.529589.

27. Akkurt, A. Comparison of roller burnishing method with other hole surface finishing processes applied on AISI 304 austenitic stainless steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2011, vol. 20, iss. 6, pp. 960-968. DOI: 10.1007/s11665-010-9718-x.

28. Mantle, A. L., Aspinwall, D. K. Surface integrity of a high-speed milled gamma titanium aluminide. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, vol. 118, iss. 1-3, pp. 143-150. DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00914-1.

29. Klocke, F., Lung, D., Arft, M. et al. On highspeed turning of a third-generation gamma titanium aluminide. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 65, iss. 1-4, pp. 155-163. DOI: 10.1007/s00170-012-4157-5.

30. Priarone, P. C., Robiglio, M., Settineri, L., Tebaldo, V. Milling and turning of titanium aluminides by using minimum quantity lubrication. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 24, pp. 62-67. DOI: 10.1016/j.procir.2014.07.147.

31. Vishnepol'skii, E. V., Pukhal'skaya, G. V., Glikson, I. L. Povyshenie soprotivleniya ustalosti mest kontsentratsii napryazhenii v tsilindricheskikh obolochkakh almaznym vyglazhivaniem [Increase in fatigue resistance of stress concentration sites in cylindrical shells by diamond burnishing]. *Visnyk dvyhunobuduvannya*, 2009, no. 1, pp. 90-94. (In Russian).

Поступила в редакцию 25.04.2020, рассмотрена на редколлегии 15.06.2020

АЛМАЗНОЕ ВЫГЛАЖИВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ НЕКОМПАКТНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИДОВ ТИТАНА

Е. В. Вишнепольский, Д. В. Павленко

Приведены результаты исследований параметров остаточной пористости поверхностного слоя образцов из сплава Ti - 45Al-3Nb - Y2O3 (OX45 - 3ODS) на основе алюминидов титана, полученных селективным лазерным спеканием, с точки зрения влияния на параметры остаточной пористости алмазного выглаживания с разными режимами и условиями. На основании результатов дисперсионного анализа выполнена оценка влияния режимов алмазного выглаживания и эффектов их парного взаимодействия на параметры пористости поверхностного слоя. Установлены закономерности изменения параметров порового пространства поверхностного слоя образцов (площади, периметра, эксцентриситета и фрактальной размерности границ пор) от подачи, усилия на выглаживатель и его радиус. Определено, что для результативного применения установленных режимов необходимо учитывать начальную пористость, которая имеет случайное распределение по площади поверхности исследуемых образцов. Выполнен корреляционный анализ и с помощью диаграммы Парето определено величину влияния режимов алмазного выглаживания на остаточную пористость. Выполнена оценка адекватности и однородности математической модели на основе критериев Фишера и Кохрена. Определены критерии оптимизации режимов выглаживания и ограничения режимных параметров. Выполнена оптимизация режимов выглаживания методом крутого восхождения. Установлены оптимальные режимные параметры обработки, с точки зрения достижения минимальной остаточной пористости в поверхностном слое. Определены технологические ограничения при использовании алмазного выглаживания для упрочнения малопластичных некомпактных материалов. Показаны перспективы дальнейших исследо52

ваний необходимых для практического применения технологии выглаживания материалов на основе алюминидов титану.

Ключевые слова: титановый сплав; алюминиды титана; селективное лазерное спекание; алмазное выглаживание; режимы; подача; усилие; радиус; поверхностный слой; пористость; оптимизация.

DIAMOND BURNISHING OF PARTS MADE OF NON-COMPACT BASED ALLOYS TITANIUM ALUMINIDE

E. V. Vyshnepolskyi, D. V. Pavlenko

Parameter research results of the residual porosity of the surface layer of samples of the alloy Ti - 45Al-3Nb - Y2O3 (OX45 - 3ODS) based on titanium aluminides obtained by selective laser sintering from the effect on the parameters of the residual porosity of diamond smoothing with different modes and conditions are presented in current article. Based on the results of variance analysis, the effect of diamond smoothing modes and their pairwise interaction on the porosity parameters of the surface layer is estimated. The regularities of changing the parameters of the pore space of the surface layer of the samples (area, perimeter, eccentricity, and fractal dimension of the pore boundaries) from the feed, the force on the vigilator and its radius are established. It has been determined that for the effective application of the established modes, it is necessary to take into account the initial porosity, which has a random distribution over the surface area of the samples under study. A correlation analysis using the Pareto diagram is performed. The magnitude of the effect of diamond smoothing modes on the residual porosity is determined. The optimization of steeple climbing modes has been performed. The optimal processing conditions have been established from achieving a minimum residual porosity in the surface layer. Technological limitations have been determined using diamond tapping for hardening non-compact materials. Further studies are necessary for the practical application of the technology of smoothing modes has been on titanium aluminides.

Keywords: titanium alloy; titanium aluminides; selective laser sintering; diamond smoothing; modes; feed; force; radius; surface layer; porosity; optimization.

Вишнепольський Євген Валерійович – старший викладач кафедри технології машинобудування, Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна.

Павленко Дмитро Вікторович – канд. техн. наук, професор кафедри технології авіаційних двигунів, Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна.

Vyshnepolskyi Yevhen Valeriiovych – Senior Lecturer, Engineering technology department, National University « Zaporizhzhya Polytechnic», Zaporizhzhya,

e-mail: evishnepolskiy@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0002-8048-7976

Pavlenko Dmytro Viktorovich – PhD, professor, Aircraft engines technologies department, National University «Zaporizhzhya Polytechnic», Zaporizhzhya, e-mail: dvp1977dvp@gmail.com.