

УДК 621.762.82

- Вишнепольский Е. В.** старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: evishnepolskiy@gmail.com
- Павленко Д. В.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии авиационных двигателей Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: dvp1977dvp@gmail.com

## ФОРМИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СПЛАВА НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИДОВ ТИТАНА, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ SLM АЛМАЗНЫМ ВЫГЛАЖИВАНИЕМ

**Цель работы.** Установить рациональный режим алмазного выглаживания деталей из сплава на основе алюминидов титана, полученных по технологии селективного лазерного спекания порошков с точки зрения качества поверхности.

**Методы исследования.** Образцы получали из интерметаллидного сплава LMD OX 45-3 (Ti45-Al3-Nb) путем лазерного осаждения порошка OX 45-3 на металлическую подложку из сплава ВТ6. Для исследования пористости образцов использовали метод анализа микрофотографий шлифов. Для обработки экспериментальных данных использовали методы математической статистики. Формирование качества поверхности выполняли алмазным выглаживанием с различными режимными параметрами. Шероховатость поверхности исследовали при помощи профилографа.

Объектом исследования являлась область рациональных, с точки зрения качества поверхности, режимных параметров алмазного выглаживания деталей из сплава на основе алюминидов титана, полученных по технологии селективного лазерного спекания порошков. Предметом исследования являлись зависимости изменения шероховатости поверхности от режимных параметров алмазного выглаживания.

**Полученные результаты.** Приведены результаты исследования изменения шероховатости поверхности плоских образцов из интерметаллидного сплава LMD OX 45-3, полученного путем селективного лазерного осаждения порошка OX 45-3 на металлическую подложку из сплава ВТ6. Установлены основные закономерности изменения шероховатости в зависимости от различных режимов и условий выглаживания. Показано, что на величину шероховатости большое влияние оказывает исходная пористость поверхностного слоя образца. Показано, что для прогнозирования величины шероховатости образцов из некомпактных материалов, после алмазного выглаживания необходимо учитывать совокупное влияние усилия выглаживания, подачи, исходной пористости поверхностного слоя и радиуса алмазного индентора. Для исследованного сплава установлено, что выглаживание с подачей более 0,1 мм/об, при усилии 0,4 кН, алмазным индентором радиусом 1 мм при наличии тупиковых пор на поверхности образца приводит к значительному ухудшению шероховатости поверхности. Установлено, что с точки зрения шероховатости поверхности, для деталей из исследованного сплава, пористость поверхностного слоя которых составляет 9...11%, наиболее рациональным режимом алмазного выглаживания является усилие выглаживания 0,3 кН, подача 0,1 мм/об и радиусе сферы алмазного индентора 4 мм.

**Научная новизна.** Установлены зависимости изменения шероховатости поверхности образцов из сплава на основе алюминидов титана в зависимости от режимных параметров выглаживания и исходной пористости.

**Практическая ценность.** На основании установленных зависимостей шероховатости поверхности от режимных параметров алмазного выглаживания и исходной пористости поверхностного слоя, установлена рациональная область изменения и сочетания режимных параметров выглаживания, при которых обеспечивается минимальная величина шероховатости поверхностей деталей из исследованного сплава, полученного по технологии селективного лазерного спекания.

**Ключевые слова:** сплав; сплав на основе алюминидов титана; поверхность; алмазное выглаживание; подача; усилие выглаживания; шероховатость; режимные параметры.

## ВВЕДЕНИЕ

Непрерывное развитие таких высокотехнологичных отраслей промышленности как авиационно-космическая, машиностроительная и других требует разработки новых конструкционных материалов, обладающих сочетанием полезных для практики эксплуатационных свойств, таких как высокие удельные прочностные свойства и упругие модули, сохраняющиеся до высоких температур, высокие жаропрочность и сопротивление ползучести, высокое сопротивление окислению и горению, низкая удельная плотность. Одним из путей решения поставленной задачи является применение интерметаллидных сплавов на основе алюминидов титана [1, 2], полученных с использованием технологий порошковой металлургии [3] и с применением аддитивных технологий [4]. Применение данных технологий позволяет сократить затраты на проектирование, освоение и изготовление новых изделий.

## 1 АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Основными преимуществами указанных технологий является возможность получения изделий с высокими значениями коэффициента использования материала, что значительно снижает затраты на последующую обработку детали [5]. Спеченные титановые сплавы и сплавы на основе алюминидов титана также обладают высокими удельными прочностными свойствами, сохраняющимися до высоких температур, отличной жаропрочностью, сопротивлением ползучести [6]. При этом оба метода позволяют получать пространственно-сложные заготовки с большим количеством конструктивных концентраторов напряжений (рис. 1).



**Рисунок 1.** Детали летательных аппаратов, получаемые с помощью аддитивных технологий и технологий порошковой металлургии

Однако, широкое применение сплавов на основе алюминидов титана (САТ) ограничено их низкой пластичностью, склонностью к хрупкому разрушению в результате деформации, наличием остаточной пористости, способствующей снижению прочности, трещиностойкости, обрабатываемости резанием, а также триботехнических

характеристик [6]. Основным недостатком таких технологий является также равнопрочность конструкций, что часто не отвечает условиям их эксплуатации, высокая чувствительность к концентрации напряжений.

Для повышения физических и механических характеристик сплавов САТ применяются различные методы как на этапе синтеза материалов, так и при их последующей обработке. Так, например, применение порошка мелкой фракции позволяет получить материал с управляемыми свойствами, однако, в свою очередь значительно увеличивается его стоимость [7]. Снижение стоимости получения полуфабрикатов САТ достигается путем применения методов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [8]. Однако, общим недостатком деталей, полученных при помощи технологий селективного лазерного спекания, порошковой металлургии, самораспространяющегося высокотемпературного синтеза является остаточная пористость, в значительной мере ухудшающая комплекс их механических характеристик.

Одними из прогрессивных методов устранения остаточной пористости в титановых полуфабрикатах являются методы интенсивной пластической деформации. В работах [9, 10, 11] показано, что их применение при обработке спеченных титановых заготовок позволяет получать компактные полуфабрикаты с улучшенными прочностными характеристиками. Однако данные технологии позволяют получать качественные исходные полуфабрикаты, требующие последующей обработки резанием. Учитывая, что механическую обработку сплавов САТ выполняют на значительно более щадящих режимах в сравнении с традиционными материалами, вследствие их низкой пластичности и теплопроводности, этот этап технологического процесса получения деталей приводит к существенному повышению стоимости [12].

Другой проблемой, ограничивающей широкое применение САТ, является их высокая чувствительность к концентрации напряжений, сопровождающаяся склонностью к зарождению усталостных трещин в области конструктивных концентраторов напряжений деталей [13]. Для ее решения применяются методы локального поверхностно пластического деформирования (ППД) [14, 15, 16]. Учитывая сложнопрофильность и малые размеры концентраторов напряжений в деталях, перспективной технологией является упрочняющая обработка алмазным выглаживанием (АВ) [17]. Однако, большая часть исследований посвящена упрочнению компактных сплавов [18, 19, 20], в то время как количество исследований АВ некомпактных (порошковых, пористых) материалов весьма ограничено.

На зарождение усталостных трещин в зонах концентрации напряжений большое влияние оказывает состояние поверхностного слоя. Одним из основных параметров, описывающих качество поверхностного слоя является шероховатость. Он описывает наличие микронеровностей на поверхности детали, которые в совокупности с зоной концентрации напряжений могут привести к появлению усталостных трещин.

Для эффективного применения алмазного выглаживания с целью снижения чувствительности САТ к концентрации напряжений необходимо установить закономерности влияния параметров выглаживания, исходя из особенностей обрабатываемого материала.

Анализ литературных источников показывает, что проблема повышения качества поверхностного слоя деталей из САТ, полученных путем применения аддитивных технологий из порошков, является актуальной и недостаточно решенной задачей.

### 2 ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью работы являлось на основании оценки влияния режимов алмазного выглаживания на качество поверхности образцов из САТ, синтезированных из порошков путем селективного лазерного спекания, установить рациональные режимные параметры алмазного выглаживания синтезированных методом SLM деталей. Для достижения поставленной цели решались задачи, связанные с разработкой и реализацией плана эксперимента по исследованию влияния режимов АВ на качество поверхности, установление зависимостей шероховатости поверхности от режимов и условий выглаживания, а также анализ установленных закономерностей с целью установления рациональных режимов обработки.

Объектом исследования являлась область рациональных, с точки зрения качества поверхности, режимных параметров алмазного выглаживания деталей из сплава на основе алюминидов титана, полученных по технологии селективного лазерного спекания порошков. Предметом исследования являлись зависимости изменения шероховатости поверхности от режимных параметров алмазного выглаживания.

### 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследований использовали стандартные выглаживатели с радиусом сферы алмаза 1,0 мм, 2,5 мм и 4 мм (рис. 2). Силу выглаживания контролировали при помощи динамометра.

В качестве смазывающей охлаждающей технологической среды применяли индустриальное масло 20.

Исследовали плоские образцы из интерметаллидного сплава LMD OX 45-3, полученного пу-

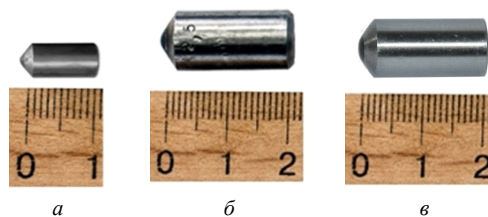


Рисунок 2. Общий вид применяемых алмазных выглаживателей с радиусом 1,0 мм (а), 2,5 мм (б), 4 мм (в)

тем лазерного осаждения порошка OX 45-3 на металлическую подложку из сплава ВТ6 [20]. Химический состав сплава LMD OX 45-3 масс. %: 3 Ti – 61,59; Al – 30,57; Nb – 7,68; Fe – 0,1. Минимальная толщина слоя сплава LMD OX 45-3 на подложке составляла 2 мм. Исследуемый сплав обладает низкой плотностью одновременно с высокой теплостойкостью и уникальными механическими свойствами, что в свою очередь востребовано в современном авиа- и машиностроении.

При выборе режимов выглаживания руководствовались, за недостатком данных для некомпактных материалов, данными, полученными ранее для традиционных компактных материалов [17]. Обработка выполнялась с усилием выглаживания 0,2; 0,3; 0,4кН; с подачей 0,05; 0,1; 0,15 мм/об.

Шероховатость поверхности образцов исследовали при помощи профилографа-профилометра фирмы TAYLOR HOBSON, который позволяет определять характеристики шероховатости в автоматическом режиме.

Микрофотографии поверхностей упрочненных образцов (рис. 3) получали при помощи цифрового микроскопа GAOSUO. Статистическую обработку экспериментальных данных и построение математических моделей выполняли в программе STATISTICA.

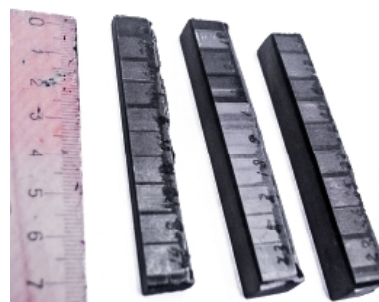
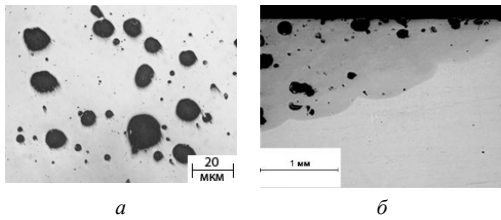


Рисунок 3. Общий вид образцов, упрочненных с различными режимами

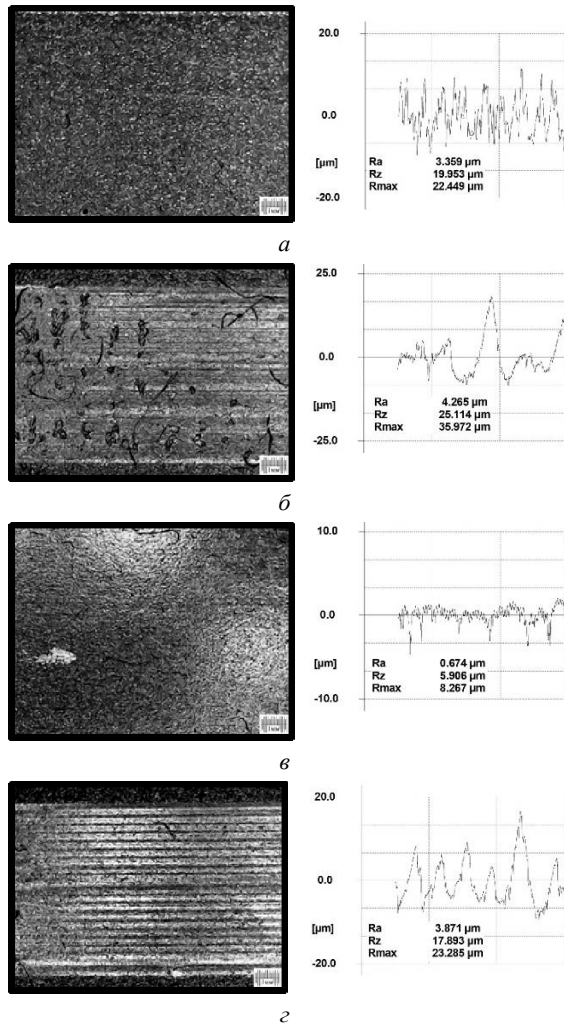
### 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Структура сплава LMD OX 45-3 представляла собой некомпактный материал, средняя величина пористости которой составляла 15%

(рис. 4). На поверхности образцов присутствовали открытые, тупиковые поры, средняя величина которых составляла 0,25 мм (рис. 5).



**Рисунок 4.** Структура поверхности (а) и переходной зоны с материалом подложки (б) исходных образцов, полученных по технологии селективного лазерного спекания



**Рисунок 5.** Поверхность образцов из сплава ОХ 45-3 после алмазного выглаживания с различными режимами: а – исходный; б – P=300 Н, S=0,05 мм/об, R=1,0 мм; в – P=300Н, S=0,1 мм/об, R=4,0мм; г – P=300 Н, S=0,15 мм/об, R=1,0 мм

На основании данных, полученных при проведении многофакторного эксперимента, построены трехмерные графики зависимости шероховатости от усилия выглаживания, подачи, радиуса сферы алмазного индентора и исходной пористости поверхностного слоя образцов (рис. 6).

Анализ полученных зависимостей показывает, что наиболее точно полиномиальные поверхности аппроксимируют закономерности влияния на шероховатость: радиуса сферы и исходной пористости (рис. 6б), усилия выглаживания и радиуса сферы алмаза (рис. 6в), подачи выглаживания и радиуса сферы алмаза (рис. 6е). Эти же сочетания факторов оказывают наибольшее влияние на шероховатость поверхности.

Установленные закономерности показывают, что для выглаживания некомпактных материалов необходимо применять выглаживатели с радиусом сферы алмаза более 2,5 мм. Выглаживатель с меньшим радиусом может попадать на тупиковые поры, что в свою очередь приводит к ухудшению шероховатости, вплоть до появления микрорезания. Применение для обработки выглаживателей с радиусом сферы более 4 мм нецелесообразно – это значительно увеличивает площадь контакта выглаживателя с обрабатываемой поверхностью и для обеспечения одного и того же удельного давления необходимо прикладывать более высокое давление, что может приводить к растрескиванию пористого материала.

Так как исследуемый материал обладает высокими прочностными характеристиками, то выглаживание с усилием менее 0,3 кН нецелесообразно, так как это не приведет к достаточной степени деформации поверхностного слоя в зоне контакта.

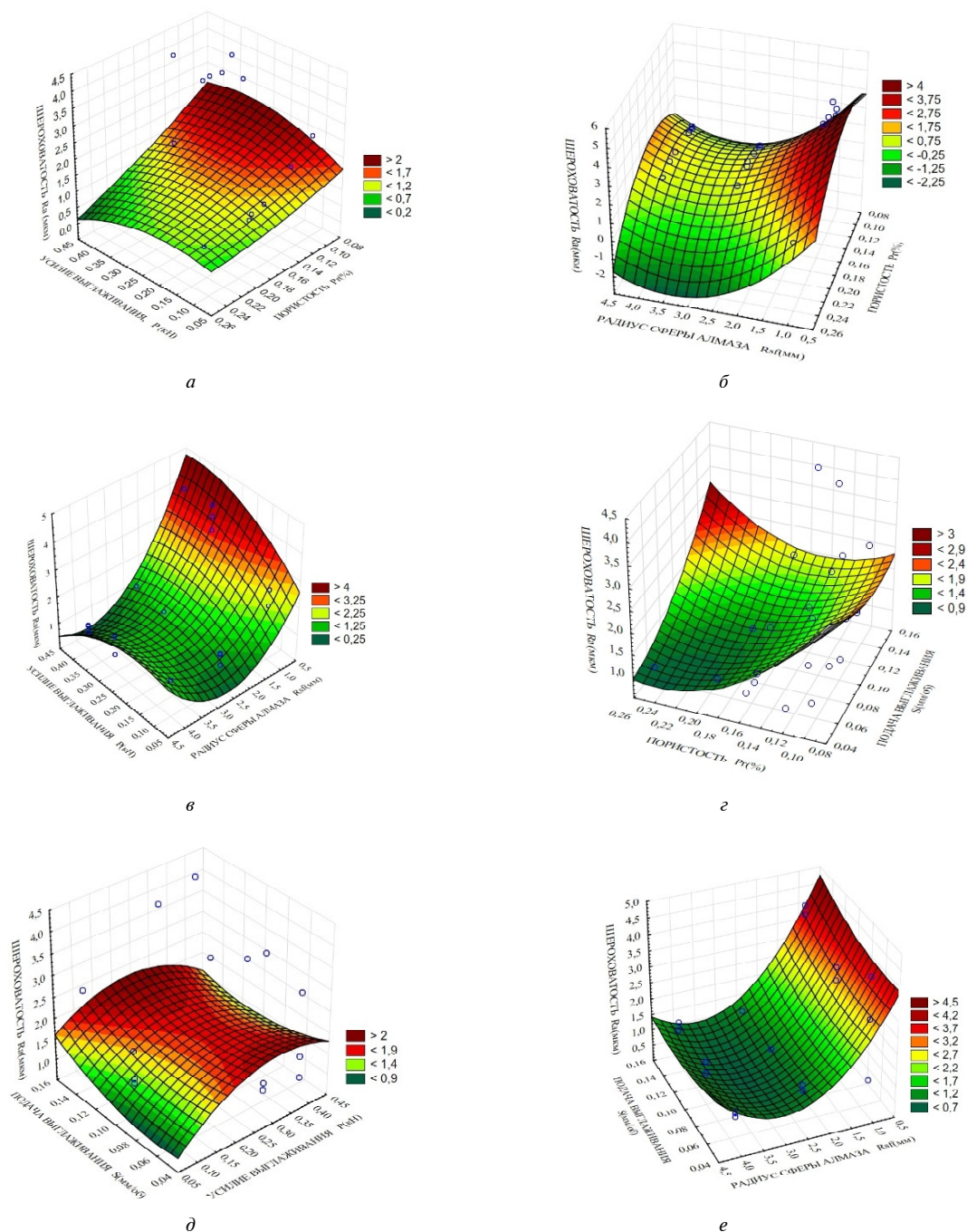
Исследование влияния подачи на шероховатость показало, что оптимальной величиной является значение 0,1 мм/об. Большая подача алмазного индентора приводит к недостаточной степени перекрытия канавок после выглаживания, меньшая, из-за низкой пластичности материала, – к разрушению уже выглаженного поверхностного слоя в следствии прохода выглаживателя рядом с уже выглаженной поверхностью.

Поскольку все исследуемые факторы оказывают в определенной степени влияние на шероховатость поверхности, то наилучшего ее значения можно достичь только их рациональным сочетанием.

На основании обработки данных многофакторного эксперимента в программе STATISTICA была получена математическая модель, описывающая совокупное влияние исходной пористости, усилия выглаживания, подачи и радиуса сферы индентора на шероховатость.

$$\begin{aligned}
 Ra = & 27,6 - 39,5 \cdot P - 128,6 \cdot S - 9,6 \cdot R - 144,5 \cdot \theta - \\
 & - 15,2 \cdot P^2 + 222,6 \cdot S^2 + 0,37 \cdot R^2 + 158,1 \cdot \theta^2 + \\
 & + 165,2 \cdot P \cdot S + 21,2 \cdot P \cdot R + 250,6 \cdot P \cdot \theta + 24,5 \cdot S \cdot R + \\
 & + 235 \cdot S \cdot \theta + 34,2 \cdot \theta \cdot R - 78,1 \cdot P \cdot S \cdot R - 105 \cdot P \cdot \theta \cdot R,
 \end{aligned}$$

где P – усилие выглаживания, кН; S – подача выглаживания, мм/об;  $\theta$  – исходная пористость поверхностного слоя, %; R – радиус сферы алмазного индентора.



**Рисунок 6.** Зависимости шероховатости поверхности образцов от режимных параметров алмазного выглаживания: *а* – от силы и исходной пористости поверхностного слоя; *б* – от радиуса сферы алмазного индентора и исходной пористости поверхностного слоя образцов; *в* – от усилия выглаживания и радиуса сферы алмазного индентора; *г* – от исходной пористости поверхностного слоя и подачи; *д* – от усилия выглаживания и подачи; *е* – от подачи и радиуса сферы алмазного индентора

Для оценки адекватности модели выполняли эксперименты в центре плана эксперимента. Расхождение экспериментальных и расчетных значений шероховатости поверхности не превышало 12 %, что объясняется влиянием одного из исследуемых факторов (исходной пористости поверхностного слоя), который носит случайный характер.

## 5 ВЫВОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования качества поверхности образцов из сплава LMD OX 45-3, полученного путем лазерного осаждения порошка OX 45-3 на металлическую подложку из сплава ВТ6, после алмазного выглаживания с различными режимами и

условиями позволили установить рациональные, с точки зрения шероховатости поверхности, режимные параметры обработки.

Установлено, что применение алмазных выглаживателей небольшого радиуса негативно сказывается на шероховатости поверхности. Обработку необходимо выполнять с усилием, находящимся в диапазоне 0,3... 0,4 кН, при подаче 0,1 мм/об.

Установлено, что на шероховатость поверхности, в независимости от режимов выглаживания, большое влияние оказывает исходная пористость поверхностного слоя, которую необходимо учитывать при назначении режимов обработки деталей. На основании анализа статистических данных получена математическая модель, описывающая совокупное влияние исследуемых факторов на шероховатость поверхности.

Таким образом, установлено, что наиболее рациональными режимными параметрами алмазного выглаживания поверхности образца, пористость которого составляет 9...11 %, с точки зрения шероховатости поверхности, является выглаживание с усилием 0,3 кН, подачей 0,1 мм/об, алмазным выглаживателем радиусом 2,5 мм.

Перспективой дальнейших исследований является установление зависимостей влияния режимных параметров алмазного выглаживания на такие параметры качества поверхностного слоя сплавов на основе алюминидов титана, как остаточная пористость, степень и глубина наклепа и остаточные напряжения. Для практического применения технологии выглаживания необходимо также установление рациональных диапазонов режимных параметров с точки зрения качества поверхностного слоя и расширение круга исследуемых материалов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Куликовский Р. А. Перспективы промышленного применения алюминидов титана в авиационном двигателестроении / Р. А. Куликовский, С. Н. Пахолка, Д. В. Павленко // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научных трудов. – 2015 – Вып. 80. – Дн-вск.: ПГАСА. – С. 369–372.
- [2]. Белоконь Ю. А. Получение интерметаллидных титановых сплавов для деталей компрессора газотурбинных двигателей на основе метода сомораспространяющегося высокоскоростного синтеза / Ю. А. Белоконь, Д. В. Павленко, С. Н. Пахолка // Вестник двигателестроения. – 2016. – № 1. – С. 72–79.
- [3]. Манохин А. И. Развитие порошковой металлургии / А. И. Манохин, М. Х. Шорников. – М.: Наука, 1988. – 77 с.
- [4]. Назаров А. П. Типовые образцы изделий, получаемых методом селективного лазерного спекания / А. П. Назаров, А. А. Окунькова // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2012. – №3(67). – С. 76–83.
- [5]. Анциферов В. Н. Перспективные материалы и технологии порошковой металлургии / В. Н. Анциферов. – Пермь: Пермский государственный технический университет, 2014. – 109 с.
- [6]. Каблов Е. Н. Интерметаллиды на основе титана и никеля для изделий новой техники / Е. Н. Каблов, В. И. Лукин // Автоматическая сварка. – 2008. – № 11. – С. 76–82.
- [7]. Петрик И. А. Разработка порошков титановых сплавов для аддитивных технологий применительно к деталям ГТД / И. А. Петрик, А. В. Овчинников, А. Г. Селиверстов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – №8(125). – С. 11–16.
- [8]. Belokon K., & Belokon Y. (2017) The Usage of Heat Explosion to Synthesize Intermetallic Compounds and Alloys. Processing, Properties, and Design of Advanced Ceramics and Composites II: Ceramic Transactions, Vol. 259, 109-115. <https://doi.org/10.1002/9781119423829.ch9>
- [9]. Павленко Д.В. Влияние деформирования методом винтовой экструзии на структуру и свойства сплава ВТ1-0 в разных состояниях / Д. В. Павленко, А. В. Овчинников // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2015. – №1. – С. 50–57.
- [10]. Павленко Д. В. Повышение технологической пластичности спеченных титановых сплавов / Д. В. Павленко // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – 2015. – Вип. 15. – С. 102–112.
- [11]. Павленко Д. В. Формирование субмикрористаллической структуры в серийных и перспективных материалах лопаток компрессора ГТД / Д. В. Павленко, В. Ю. Кащуба, С. Н. Пахолка // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 10(127). – С. 33–39.
- [12]. Артеменко Н. С. Исследование лезвийной обрабатываемости интерметаллидов / Н. С. Артеменко, Д. С. Реченко, Ю.В. Титов, Е.В. Кривонос, А.В. Дейлова // Омский научный вестник. – 2016. – № 3(147). – С. 44–46.
- [13]. Djanarthany S., Viala J.C., & Bouix J., (2001). An overview of monolithic titanium aluminides based on Ti3Al and TiAl. Materials Chemistry and Physics. Vol. 72, 301–319. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(01\)00328-5](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(01)00328-5)
- [14]. Edalati K., Daio T., Arita M., Lee S., Horita Z., Tanaka I. (2014). High-pressure torsion of titanium at cryogenic and room temperatures: Grain size effect on allotropic phase transformations. Acta

- materialia, Vol. 68, 207 – 213. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.01.037>
- [15]. Shengqiang Y., & Wenhui L. (2017). Surface Finishing Theory and New Technology. China.: Springer.
- [16]. Lindemann J., Buque C., & Appel F., (2006). Effect of shot peening on fatigue performance of a lamellar titanium aluminide alloy. Acta Materialia, Vol. 54, 1155–1164 <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.10.043>
- [17]. Повышение сопротивления усталости мест концентрации напряжений в цилиндрических оболочках алмазным выглаживанием / Е. В. Вишнепольский, Г. В. Пухальская, И. Л. Гликсон // Вісник двигунобудування. – 2009. – №1. – С. 90–94.
- [18]. Varga G. (2014). Effects of Technological Parameters on the Surface Texture of Burnished Surfaces. Key Engineering Materials. Vol. 581, 403 – 408. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.581.403>
- [19]. Lhnska K. & Kodácsy J., (2012) Investigation of the Microgeometry after Hard Turning and Diamond Burnishing. Advanced Materials Research. Vol. 472–475, 902–907. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.472-475.902>
- [20]. Hamadache H., Zemouri Z., Laouar L., & Dominiak, S., (2014) Improvement of surface conditions of 36 Cr Ni Mo 6 steel by ball burnishing process. Journal of Mechanical Science and Technology. Vol. 28(4), 1491–1498. DOI: 10.1007/s12206-014-0135-1

Статья поступила в редакцию 30.06.2018

**Вишнепольський Є. В.** старший викладач кафедри технології машинобудування, Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: [evishnepolskiy@gmail.com](mailto:evishnepolskiy@gmail.com)

**Павленко Д. В.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри технології авіаційних двигунів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: [dvp1977dvp@gmail.com](mailto:dvp1977dvp@gmail.com)

## ФОРМУВАННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ ІЗ СПЛАВУ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІДІВ ТИТАНУ, ОТРИМАНИХ ПО ТЕХНОЛОГІЇ SLM АЛМАЗНИМ ВИГЛАДЖУВАННЯМ

**Мета роботи.** Встановити раціональний режим алмазного вигладжування деталей із сплаву на основі алюмінідів титану, отриманих за технологією селективного лазерного спікання порошків з точки зору якості поверхні.

**Методи дослідження.** Зразки отримували з інтерметалідного сплаву LMD OX 45-3 (Ti45-Al3-Nb) шляхом лазерного осадження порошку OX 45-3 на металеву підложку із сплаву VT6. Для дослідження пористості зразків використовували метод аналізу мікрофотографій шліфів. Для обробки експериментальних даних використовували методи математичної статистики. Формування якості поверхні виконували алмазним вигладжуванням з різними режимними параметрами. Шорсткість поверхні досліджували за допомогою профілографу.

Об'єктом дослідження була область раціональних, з точки зору якості поверхні, режимних параметрів алмазного вигладжування деталей із сплаву на основі алюмінідів титану, отриманих за технологією селективного лазерного спікання порошків. Предметом дослідження були залежності зміни шорсткості поверхні від режимних параметрів алмазного вигладжування.

**Отримані результати.** Надані результати дослідження зміни шорсткості поверхні плоских зразків з інтерметалідного сплаву LMD OX 45-3, отриманого шляхом селективного лазерного осадження порошку OX 45-3 на металеву підложку із сплаву VT6. Встановлені основні закономірності зміни шорсткості в залежності від різних режимів та умов вигладжування. Показано, що на величину шорсткості великий вплив оказує вихідна пористість поверхневого шару зразка. Показано, що для прогнозування величини шорсткості зразків з некомпактних матеріалів, після алмазного вигладжування необхідно враховувати сукупний вплив зусилля вигладжування, подачі, вихідної пористості поверхневого шару та радіусу алмазного індентора. Для досліджуваного сплаву встановлено, що вигладжування з подачею більше ніж 0,1 мм/об, при зусиллі 0,4 кН, алмазним індентором радіусом 1 мм, при наявності тупикових пор на поверхні зразка, призводить до значного погіршення шорсткості поверхні. Встановлено, що з точки зору шорсткості поверхні, для деталей з досліджуваного сплаву, пористість поверхневого шару котрих складає 9...11 %, найбільш раціональним режимом алмазного вигладжування є зусилля вигладжування 0,3 кН, подача 0,1 мм/об та радіусі сфери алмазного індентору 4 мм.

**Наукова новизна.** Встановлені залежності зміни шорсткості поверхні зразків із сплаву на основі алюмінідів титану в залежності від режимних параметрів вигладжування та вихідної пористості.

**Практична цінність.** На основі встановлених залежностей шорсткості поверхні від режимних параметрів алмазного вигладжування та вихідної пористості поверхневого шару, встановлена раціональна область зміни та поєднання режимних параметрів, при яких забезпечується мінімальна величина шорсткості поверхонь деталей із досліджуваного сплаву, отриманого за технологією селективного лазерного спікання.

**Ключові слова:** сплав; сплав на основі алюмінідів титану; поверхня; алмазне вигладжування; подача; зусилля вигладжування; шорсткість; режимні параметри.

**Vyshnepolskyi Y. V.** Senior Lecturer of the Mechanical Engineering Department of Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: evishnepolskiy@gmail.com

**Pavlenko D. V.** Ph.D, Associate Professor, Associate Professor of the Aircraft Engines Technologies Department of Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: dvp1977dvp@gmail.com

## FORMING THE QUALITY OF SURFACE OF THE PARTS MADE OF TITANIUM ALUMINIDE ALLOY OBTAINED BY SLM TECHNOLOGY BY DIAMOND SMOOTHING

**Purpose.** To establish a rational mode of diamond smoothing of the parts made of titanium aluminide alloy obtained by selective laser sintering of powders in terms of surface quality.

**Methodology.** The samples were prepared from the intermetallic alloy LMD OX 45-3 (Ti45-Al3-Nb) by laser deposition of OX 45-3 powder on a metal substrate made of BT6 alloy. To study the porosity of samples, the analysis of microphotographs of metallographic specimens was used. For the processing of experimental data, the methods of mathematical statistics were used. The surface quality was formed by diamond smoothing with various operating conditions. The surface roughness was examined using a profilograph.

**Findings.** The results of study of the variation of surface roughness of flat samples made of intermetallic alloy LMD OX 45-3 obtained by selective laser deposition of OX 453 powder onto the metal substrate of VT6 alloy are presented. The basic regularities of roughness variation are determined depending on different modes and conditions of smoothing. It is shown that the roughness is greatly affected by the initial porosity of the surface layer of the sample. It is shown that in order to predict the roughness of samples made of non-compact materials, after the diamond smoothing it is necessary to take into account the combined effect of the smoothing force, the feed, the initial porosity of the surface layer, and the radius of the diamond indenter. For the alloy studied, it was found that smoothing with a feed rate of more than 0.1 mm/rev, with a force of 0.4 kN, the diamond indenter with a radius of 1 mm, in the presence of dead-end pores on the surface of the sample, leads to a significant deterioration in the surface roughness. It is established that from the point of view of the surface roughness, for the details of the investigated alloy, which surface layer porosity is 9 to 11%, the most rational mode of diamond smoothing is a smoothing force of 0.3 kN, a feed of 0.1 mm/rev and a radius of diamond indenter sphere of 4 mm.

**Scientific novelty.** The dependences of the surface roughness variation of the samples made of titanium aluminide alloy depending on the operating conditions of smoothing and initial porosity are established.

**Practical value.** Based on the established dependencies of the surface roughness on the operating conditions of diamond smoothing and the initial porosity of the surface layer, a rational area has been established to change and combine the operating conditions of smoothing, which ensure the minimum roughness of the surfaces of parts made of the investigated alloy, obtained using selective laser sintering technology.

**Keywords:** alloy; titanium aluminide alloy; surface; diamond smoothing; feed; smoothing force; roughness; operating conditions.

### REFERENCES

- [1]. Kulikovskiy R.A., Paholka S.N., & Pavlenko D.V. (2015) Perspektivy promyshlennogo primeneniya alyuminidov titana v aviadvigatelestroenii [Prospects for the industrial use of aluminum in titanium in the aircraft engine industry]. *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroyeniye*. Sb. nauchnykh trudov, Vol. 80, 369–372 (in Russian).
- [2]. Belokon Yu.A., Pavlenko D.V., & Paholka S.N. (2016) Poluchenie intermetallidnykh titanovykh splavov dlya detaley kompressora gazoturbinnykh



- dvigateley na osnove metoda somorasprostranyayuschegosya vyisokoskorostnogo sinteza [Production of intermetallic titanium alloys for gas turbine engine compressor components on the basis of the high-velocity synthesis] *Vestnik dvigatelestroeniya*, 1, 72–79 (in Russian).
- [3]. Manohin A.I. (1988). *Razvitie poroshkovoy metallurgii* [Development of powder metallurgy]. Moscow: Nauka (in Russian).
- [4]. Nazarov A.P., & Okunkova A.A. (2012) Tipovyye obraztzy izdeliy, poluchaemykh metodom selektivnogo lazernogo spekaniya [Typical samples of products obtained by selective laser sintering]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. – Bulletin of the Saratov State Technical University. 3(67). 76–83 (in Russian).
- [5]. Antsiferov V.N. (2014). *Perspektivnyye materialy i tekhnologii poroshkovoy metallurgii* [Perspective materials and technologies of powder metallurgy]. Perm: Permskiy gosudarstvennyy tekhnicheskyy universitet (in Russian).
- [6]. Kablov E.N., & Lukin V.I. (2008). *Intermetallidy na osnove titana i nikelya dlya izdeliy novoy tekhniki* [Intermetallics based on titanium and nickel for new products] *Avtomaticheskaya svarka*, Vol. 11. 76 – 82 (in Russian).
- [7]. Petrik I.A., Ovchinnikov A.V., & Seliverstov A.G. *Razrabotka poroshkov titanovykh splavov dlya additivnykh tekhnologiy primenitelno k detal'yam GTD* [Development of powders of titanium alloys for additive technologies applied to GTE parts]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 8(125), 11–16 (in Russian).
- [8]. Belokon K., & Belokon Y. (2017) The Usage of Heat Explosion to Synthesize Intermetallic Compounds and Alloys. Processing, Properties, and Design of Advanced Ceramics and Composites II: *Ceramic Transactions*, Vol. 259, 109-115 <https://doi.org/10.1002/9781119423829.ch9>
- [9]. Pavlenko D.V. & Ovchinnikov A.V. (2015) *Vliyaniye deformirovaniya metodom vintovoy ekstruzii na strukturu i svoystva splava VT1-0 v raznykh sostoyaniyakh* [Effect of deformation by screw extrusion on the structure and properties of the alloy VT1-0 in different states] *Fiziko-khimichna mehanika materialiv*, 1, 50–57 (in Russian).
- [10]. Pavlenko D.V. (2015) *Povyisheniye tekhnologicheskoy plastichnosti spechennykh titanovykh splavov* [Increase of technological plasticization of sintered titanium alloys]. *Protseki mehanichnoui obrobki v mashinobuduvanni*, Vol. 15, 102–112 (in Russian).
- [11]. Pavlenko D.V., Katsyuba V.Yu., & Paholka S.N. (2015) *Formirovaniye submikrokristallicheskoy struktury v seriynykh i perspektivnykh materialakh lopatok kompressora GTD* [Formation of submicrocrystalline structure in serial and perspective materials of GTE compressor blades]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, Vol. 10(127). 33–39 (in Russian).
- [12]. Artemenko N.S., Rechenko D.S., Titov Yu.V., Krivonos E.V., & Deylova A.V. *Issledovaniye lezviynoy obrabatyvaemosti intermetallidov* [Investigation of blade interchangeability of intermetallic compounds] *Omskiy nauchnyy vestnik*, Omsk Scientific Bulletin. 3(147). 44 – 46 (in Russian).
- [13]. Djanarthany S., Viala J.C., & Bouix J., (2001). An overview of monolithic titanium aluminides based on Ti3Al and TiAl. *Materials Chemistry and Physics*. Vol. 72. 301 – 319. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(01\)00328-5](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(01)00328-5)
- [14]. Edalati K., Daio T., Arita M., Lee S., Horita Z., Tanaka I. (2014). High-pressure torsion of titanium at cryogenic and room temperatures: Grain size effect on allotropic phase transformations. *Acta Materialia*, Vol. 68, 207 – 213. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.01.037>
- [15]. Shengqiang Y., & Wenhui L., (2017). *Surface Finishing Theory and New Technology*. China.: Springer.
- [16]. Lindemann J., Buque C., & Appel F., (2006). Effect of shot peening on fatigue performance of a lamellar titanium aluminide alloy. *Acta Materialia*, Vol. 54, 1155–1164 <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.10.043>
- [17]. Vishnepolskiy E.V., Puhalskaya G.V., & Glikson I.L., (2009) *Povyisheniye soprotivleniya ustalosti mest kontsentratsii napryazheniy v tsilindricheskikh obolochkakh almaznyim vyglazhivaniem* [Increase in fatigue resistance of stress concentration sites in cylindrical shells by diamond smoothing]. *Visnik dvigunobuduvannya*, 1. 90–94 (in Russian).
- [18]. Varga G. (2014). Effects of Technological Parameters on the Surface Texture of Burnished Surfaces. *Key Engineering Materials*. Vol. 581., 403 – 408. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.581.403>
- [19]. Lhska K. & Kodácsy J., (2012) Investigation of the Microgeometry after Hard Turning and Diamond Burnishing. *Advanced Materials Research*. Vol. 472–475, 902–907. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.472-475.902>
- [20]. Hamadache H., Zemouri Z., Laouar L., & Dominiak S., (2014) Improvement of surface conditions of 36 Cr Ni Mo 6 steel by ball burnishing process. *Journal of Mechanical Science and Technology*. Vol. 28(4), 1491 - 1498. DOI 10.1007/s12206-014-0135-1