

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-1-62-69>

УДК 621.762.82

Эффективность уплотнения некомпактных сплавов алмазным выглаживанием

Е. В. Вишнепольский¹⁾, канд. техн. наук, доц. Д. В. Павленко¹⁾

¹⁾Запорожский национальный технический университет (Запорожье, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Активное применение деталей, синтезированных с помощью аддитивных технологий из порошков, ограничивается из-за наличия остаточной пористости, способствующей снижению прочности, пластичности, вязкости разрушения, трещиностойкости, обрабатываемости резанием, а также триботехнических характеристик. Предложено для расширения сферы применения деталей, полученных из некомпактных сплавов, использовать методы упрочнения поверхностного слоя. Исследованы особенности локального поверхностно-пластического деформирования алмазным выглаживанием образцов из спеченного титанового сплава BT1-0, а также сплава на основе алюминидов титана LMD OX 45-3 (Ti-45Al-3Nb), синтезированного путем селективного лазерного спекания. Установлено, что алмазное выглаживание является эффективным способом уплотнения поверхностного слоя образцов из малопластичных некомпактных материалов, полученных различными способами. Показано, что для эффективного устранения пористости и повышения прочности поверхностного слоя несущих поверхностей деталей из этих материалов обработку необходимо выполнять в узком диапазоне режимных параметров с учетом механических свойств материала, остаточной пористости и параметров инструмента. Например, использование алмазных выглаживателей с радиусом сферы 0,5 мм вследствие маленькой контактной поверхности инструмента и низкой пластичности обрабатываемого материала приводит к разрушению поверхностного слоя, так как инструмент «проваливается» в большие поры, что ведет к скалыванию материала или неравномерному воздействию инструмента на поверхностный слой. Определено, что для результативного применения установленных режимов необходимо учитывать исходную пористость, которая имеет случайное распределение по площади поверхности исследуемых образцов. Для максимальной эффективности уплотнения сплава на основе спеченного титанового сплава BT1-0, а также сплава на основе алюминидов титана LMD OX 45-3 (Ti-45Al-3Nb) необходимо учитывать совокупное влияние параметров выглаживания.

Ключевые слова: алмазное выглаживание, титан, алюминид титана, некомпактный сплав, порошковая металлургия, аддитивные технологии

Для цитирования: Вишнепольский, Е. В. Эффективность уплотнения некомпактных сплавов алмазным выглаживанием / Е. В. Вишнепольский, Д. В. Павленко // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 1. С. 62–69. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-1-62-69>

Consolidation Efficiency of Noncompact Alloys by Diamond Burnishing

E. V. Vishnepolskiy¹⁾, D. V. Pavlenko¹⁾

¹⁾Zaporozhye National Technical University (Zaporozhye, Ukraine)

Abstract. Active use of parts synthesized while using additive technologies from powders is limited due to presence of residual porosity contributing to a decrease in strength, ductility, fracture toughness, crack resistance, workability by cutting, as well as tribotechnical characteristics. It has been proposed in order to expand scope of parts application derived from non-compact alloys to use methods of surface layer hardening. Specific features of local surface-plastic deformation have

Адрес для переписки

Павленко Дмитрий Викторович
Запорожский национальный технический университет
ул. Жуковского, 64,
69063, г. Запорожье, Украина
Тел.: +380 61 769-82-69
dvp1977dvp@gmail.com

Address for correspondence

Pavlenko Dmitriy V.
Zaporozhye National Technical University
64 Zhukovskogo str.,
69063, Zaporozhye, Ukraine
Tel.: +380 61 769-82-69
dvp1977dvp@gmail.com

been investigated by diamond smoothing of samples from a sintered titanium alloy BT1-0, as well as an alloy based on titanium aluminides LMD OX 45-3 (Ti-45Al-3Nb) synthesized by selective laser sintering. It has been established that diamond burnishing is an effective method of compacting surface layer of samples from low-plastic non-compact materials obtained by various methods. It has been shown that in order to eliminate effectively porosity and increase strength of a surface layer for bearing surfaces of parts made from these materials, processing must be performed in a narrow range of mode parameters taking into account mechanical properties of the material, residual porosity and tool parameters. For example, application of diamond smoothers with a sphere radius of 0.5 mm leads due to a small contact surface of a tool and low ductility of the material being processed to destruction of the surface layer, as the tool “fails” into large pores, which causes spalling of the material or uneven effect of the tool on the surface layer. It has been determined that for the effective application of the established regimes it is necessary to take into account an initial porosity which has a random distribution over the surface area of the studied samples. For maximum compaction efficiency of an alloy based on a sintered titanium alloy BT1-0, as well as an alloy based on titanium aluminides LMD OX 45-3 (Ti-45Al-3Nb), a cumulative effect of smoothing parameters should be taken into account.

Keywords: diamond burnishing, titanium, aluminide titanium, noncompact alloy, powder metallurgy, additive technologies

For citation: Vishnepolskiy E. V., Pavlenko D. V. (2019) Consolidation Efficiency of Noncompact Alloys by Diamond Burnishing. *Science and Technique*. 18 (1), 62–69. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-1-62-69> (in Russian)

Введение

Развитие современной техники, особенно авиационной и аэрокосмической, требует непрерывной разработки и применения нетрадиционных конструкционных материалов, обеспечивающих более высокие технологические и эксплуатационные свойства, снижение массы конструкций, а также их стоимости. Одним из классов материалов, удовлетворяющих столь противоречивым требованиям, являются некомпактные сплавы. К ним относят спеченные сплавы, получаемые методами порошковой металлургии [1], и сплавы, изготавливаемые путем селективного лазерного спекания [2]. Основное достоинство данных технологий – возможность получения заготовки по форме, близкой к готовой детали, что существенно снижает затраты на механическую обработку [3]. Технологии порошковой металлургии позволяют производить мелкосерийные партии сплавов различного химического состава и псевдоспла-

вов [4], гармонические материалы [5], а также материалы с наименьшим содержанием примесей, точным соответствием химическому составу (в сравнении с литыми сплавами) за счет применения чистых порошков [6]. Низкий удельный вес таких материалов способствует снижению массы конструкций. Спеченные титановые сплавы и сплавы на основе алюминидов титана также обладают высокими удельными прочностными свойствами, сохраняющимися до высоких температур, отличной жаропрочностью, сопротивлением ползучести [7]. В целом применение аддитивных технологий порошковой металлургии и селективного лазерного синтеза (3D-печати) позволяет значительно сократить время на механическую обработку, а в случае синтеза детали на принтере – и на подготовку производства. При этом обе технологии обеспечивают получение пространственно сложных заготовок деталей машин, содержащих такие конструктивные концентраторы напряжений, как отверстия, галтели и др. (рис. 1).

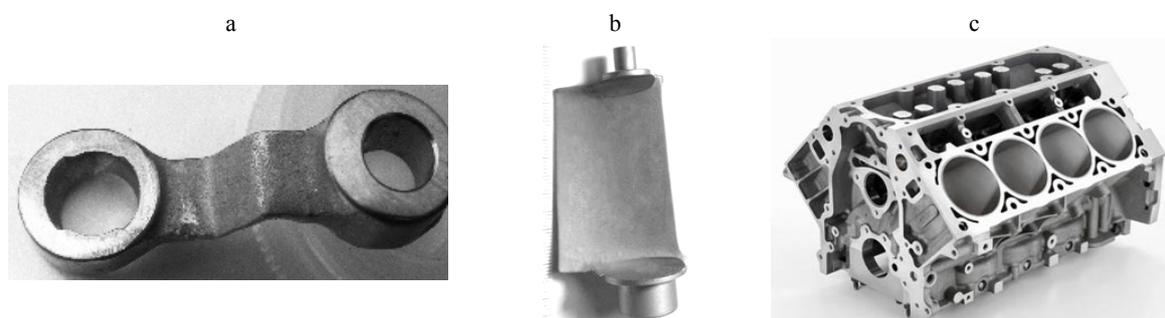


Рис. 1. Заготовки деталей машин, полученные путем синтеза из порошков:

а – рычаг управления положением лопаток направляющего аппарата газотурбинного двигателя ТВ3-117;
 б – лопатка направляющего аппарата; в – блок цилиндров поршневого двигателя

Fig. 1. Billets of machine parts obtained by synthesis from powder: a – lever for controlling position of blades in guiding device of gas turbine engine TB3-117; b – blade of guiding device; c – cylinder block of piston engine

Активное применение деталей, синтезированных из порошков, ограничивается из-за наличия остаточной пористости, способствующей снижению прочности, пластичности, вязкости разрушения, трещиностойкости, обрабатываемости резанием, а также триботехнических характеристик [7]. Недостатком таких технологий является равнопрочность конструкций, что часто не отвечает условиям их эксплуатации.

Для управления пористостью могут быть использованы различные мероприятия на этапе как синтеза детали, так и отделочно-упрочняющей обработки. Так, применение мелкодисперсного порошка с использованием различных режимов прессования [8] позволяет получить детали с заданными параметрами пористости [9]. Однако это значительно повышает их стоимость.

На устранение недостатков аддитивных технологий направлены работы многих исследователей. Высокую стоимость сферического порошка титана пытаются снизить применением несферического порошка декорированного титана, который по некоторым показателям превосходит сферический [10]. Для промышленного применения необходимо решить проблему распределения этого порошка в ограниченном объеме.

Остаточная пористость заготовок может быть снижена путем применения методов интенсивного пластического деформирования. Одним из наиболее перспективных методов является пластическое деформирование с помощью винтовой экструзии, которое позволяет снизить пористость по всему сечению полуфабриката. При помощи данного метода также решается проблема разрушения оксидного каркаса на поверхности частичек порошка титана [11, 12]. В [13] показано, что при интенсивной пластической деформации некомпактных материалов для них характерно наличие двух качественно различных стадий упрочнения и предшествующей им стадии уплотнения. При этом устранение пористости также способствует повышению прочности заготовок. Такие технологии позволяют получать качественные полуфабрикаты, которым впоследствии необходима длительная механическая обработка.

Одной из проблем деталей, полученных путем синтеза из порошков, являются значительное снижение механических свойств при на-

личии в конструкции детали конструктивных концентраторов напряжений, а также низкие триботехнические характеристики поверхностного слоя. Ее решение предполагается выполнять путем оптимизации геометрии конструктивных концентраторов напряжений и их упрочнения с помощью локального поверхностного пластического деформирования (ППД).

Учитывая малые размеры отверстий и галтелей в деталях машин, а также то, что они могут быть зонами инициации разрушения, одной из перспективных технологий упрочняющей обработки является алмазное выглаживание (АВ) [14]. По сравнению с другими методами АВ позволяет обрабатывать детали разного типоразмера, небольшая величина деформирующего элемента дает возможность обрабатывать тонкостенные детали, обеспечивая высокую шероховатость и сжимающие остаточные напряжения. Особенности процессов, протекающих в поверхностном слое при АВ, определяют эффективность применения алмазного выглаживания для снижения остаточной пористости и повышения механических характеристик мест концентрации напряжений.

Известно, что обработка резанием и упрочнение спеченных заготовок имеют ряд особенностей по сравнению с обработкой компактных материалов. Увеличение пористости материала приводит к снижению силы резания в 1,6–1,7 раза и ухудшению шероховатости поверхности детали [15].

Анализ литературных данных показывает, что сегодня вопрос повышения качества поверхностного слоя некомпактных деталей, полученных путем применения аддитивных технологий из порошков, является актуальной и нерешенной задачей. Отсутствуют рекомендации по назначению режимов обработки конструктивных концентраторов напряжений, а также по выбору технологической оснастки в зависимости от материала детали и состояния поверхностного слоя.

Цель работы – оценка возможности уплотнения конструктивных концентраторов напряжений деталей, синтезированных из порошков на основе применения аддитивных технологий с использованием методов локального ППД. Для этого были решены задачи, связанные с выбором упрочняющих методов и инструмен-

тов, выполнено экспериментальное исследование влияния режимов обработки на качество поверхности образцов, полученных синтезом из порошков титана методами порошковой металлургии, и сплава на основе алюминидов титана, синтезированного путем 3D-печати.

Основная часть

В процессе алмазного выглаживания на механизм деформирования поверхностного слоя значительное влияние оказывает сила трения. Интенсивность внешнего трения при ППД зависит от свойств материала, величины усилий деформирования, характера и геометрии контактирующих поверхностей и адгезионных связей между инструментами и поверхностью деформирования. При выглаживании коэффициент трения включает в себя деформационную и адгезионную составляющие.

Согласно данным Д. Д. Папшева [16], на деформационную составляющую влияют радиус сферы алмаза и глубина его внедрения. На адгезионную составляющую большое влияние оказывают материалы контактирующих поверхностей. При выглаживании титановых сплавов адгезионное взаимодействие между алмазом и обрабатываемым материалом значительно усиливается, и может происходить налипание частичек титана на поверхность инструмента, что приводит к его повышенному износу и ухудшению шероховатости поверхностного слоя.

Ранее установлено [17], что значительное влияние на трение будут оказывать подача и скорость выглаживания, так как по данным параметрам определяют время удельного воздействия в точке контакта. Однако это требует экспериментального подтверждения.

Вследствие адгезионного взаимодействия алмаза и титана необходимо применение смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС), снижающих это взаимодействие. По данным Э. Г. Грановского [18], при алмазном выглаживании с применением индустриального масла износ инструмента снижается почти в пять раз по сравнению с обработкой без СОТС. Из доступных СОТС предпочтительно использование индустриального масла сульфифрезола 20.

Согласно ТУ 2-037-631-88, алмазные выглаживатели применяются с радиусом сферы алмаза 0,5–4,0 мм, в результате поверхность контакта инструмента с деталью оказывается незначительной. Это обуславливает создание высоких контактных давлений, необходимых для процесса пластической деформации при небольших нормальных силах, передаваемых со стороны деформирующего инструмента на обрабатываемую поверхность детали. Однако применение выглаживателей небольшого радиуса для упрочнения некомпактных материалов требует дополнительных исследований. Инструмент может «проваливаться» в большие поры, что приводит к скалыванию материала или неравномерному воздействию инструмента на поверхностный слой.

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

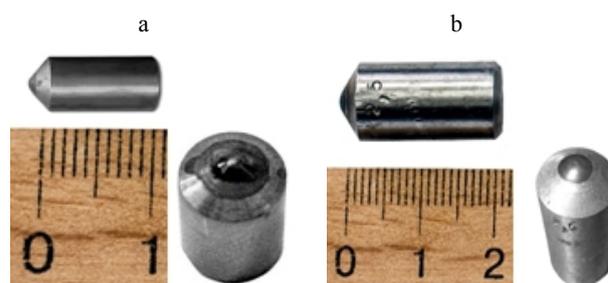


Рис. 2. Общий вид применяемых алмазных выглаживателей с различными радиусами: а – 0,5 мм; б – 2,5 мм

Fig. 2. General view of applied diamond smoothers with different radius: a – 0.5 mm; b – 2.5 mm

В качестве СОТС применяли индустриальное масло сульфифрезол 20. Объектом исследования являлись цилиндрические образцы из спеченного титанового сплава ВТ1-0 и плоские образцы из интерметаллидного сплава LMD OX 45-3, полученные путем лазерного осаждения порошка OX 45-3 на металлическую подложку из сплава ВТ6 [19]. Химический состав LMD OX 45-3, мас. %: Ti – 61,59; Al – 30,57; Nb – 7,68; Fe – 0,10.

Выбор указанных материалов в качестве объекта исследования объясняется существенным различием их механических характеристик. Так, спеченный сплав ВТ1-0 при пределе прочности 325 МПа обладает условным пределом текучести 285 МПа. Характеристики пла-

стичности сплава составляют 6 и 3 % для относительного удлинения и сужения соответственно [20]. В то же время относительное удлинение и сужение для интерметаллидного сплава LMD OX 45-3 находятся на уровне 1–2 %.

Пористость образцов определяли методом гидростатического взвешивания согласно ГОСТ 18847–84 и путем анализа микрофотографий металлографических шлифов образцов по ГОСТ 9391–80. При изучении микрофотографий поверхности шлифа использовали программу анализа изображений Image-Pro Plus (рис. 3). Пористость спеченных титановых образцов составляла 10–12 %, интерметаллидных, синтезированных путем 3D-печати, – 17–22 %.

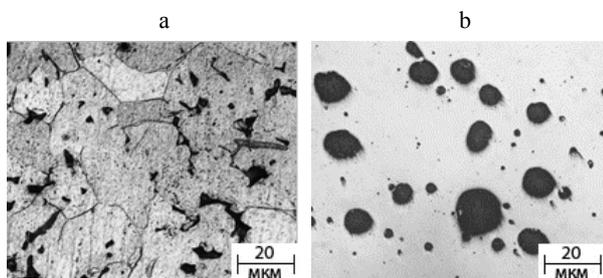


Рис. 3. Микроструктура поверхностного слоя образцов: а – сплав VT1-0; б – сплав LMD OX 45-3

Fig. 3. Microstructure of surface layer in specimens: а – VT1-0 alloy; б – LMD OX 45-3 alloy

Микрофотографии поверхностей образцов (рис. 4) получали при помощи цифрового микроскопа GAOSUO.

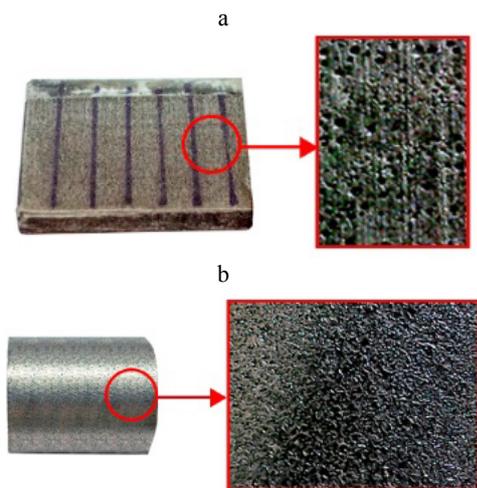


Рис. 4. Образцы для исследований: а – из сплава LMD OX 45-3 (×50); б – из спеченного титанового сплава VT1-0 (×50)

Fig. 4. Specimens for research: а – from LMD OX 45-3 (×50); б – from sintered titanium VT1-0 alloy (×50)

Плоские образцы обрабатывали выглаживателем с индентором радиусом 0,5 мм с усилиями 200, 300 и 400 Н на универсальном вертикально-фрезерном станке JAROCIN FWD 321 (рис. 5а). Диапазон усилий выбирали исходя из предварительных экспериментов с учетом возможного разрушения поверхности образца. Цилиндрические образцы из спеченного титана обрабатывали на токарно-винторезном станке 16К20 (рис. 5б) индентором радиусом 0,5 мм. Выглаживали участки шириной 2–3 мм на одном образце с различными режимами.

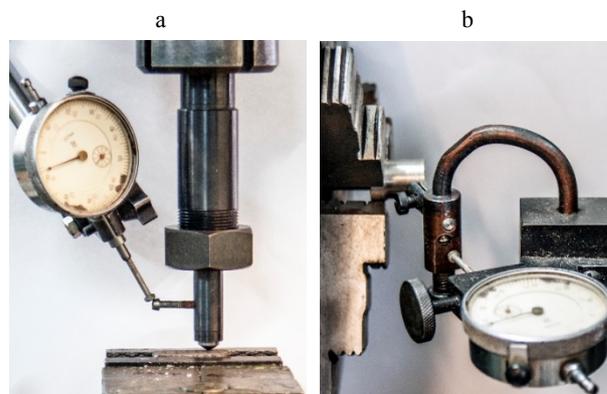


Рис. 5. Общий вид технологической оснастки для выглаживания плоских (а) и цилиндрических (б) образцов

Fig. 5. General view of industrial equipment for burnishing flat (а) and cylindrical (б) specimens

Анализ поверхностей, подвергнутых выглаживанию, показал, что при алмазном выглаживании образца из сплава LMD OX 45-3 происходит значительное вдавливание индентора в обрабатываемую поверхность, приводя к разрушению поверхностного слоя (рис. 6).

Сила выглаживания оказывает значительное влияние на качество поверхностного слоя. Обработка образца с силой 400 Н индентором радиусом 0,5 мм (рис. 6с) вызывает ухудшение качества поверхностного слоя. Это может быть вызвано совокупным влиянием нескольких факторов: невысокой пластичностью материала образца, величиной радиуса индентора и усилием выглаживания. Низкая пластичность спеченного сплава на основе алюминидов титана приводит к тому, что в поверхностном слое при упрочнении пластическое течение металла, присущее компактным материалам, затруждено.

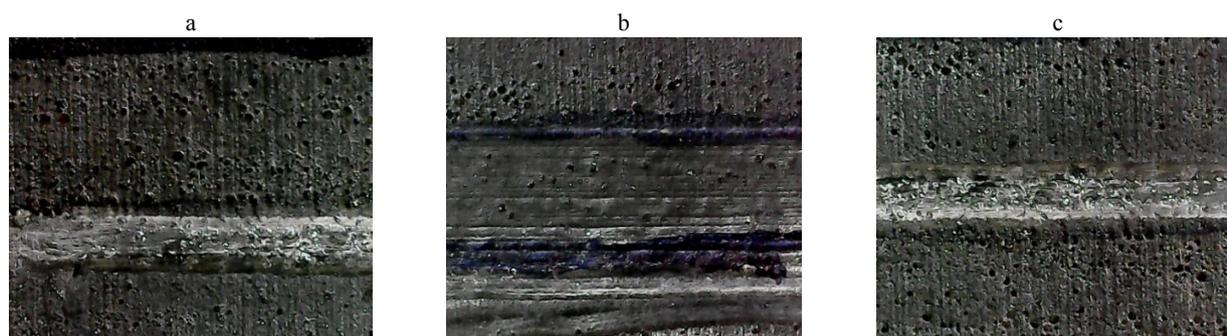


Рис. 6. Поверхности образца из сплава LMD OX 45-3 после выглаживания с различными усилиями, Н: а – 200; б – 300; с – 400 (×50)

Fig. 6. Surface of specimens from LMD OX 45-3 alloy after burnishing while using various efforts, N: а – 200; б – 300; с – 400 (×50)

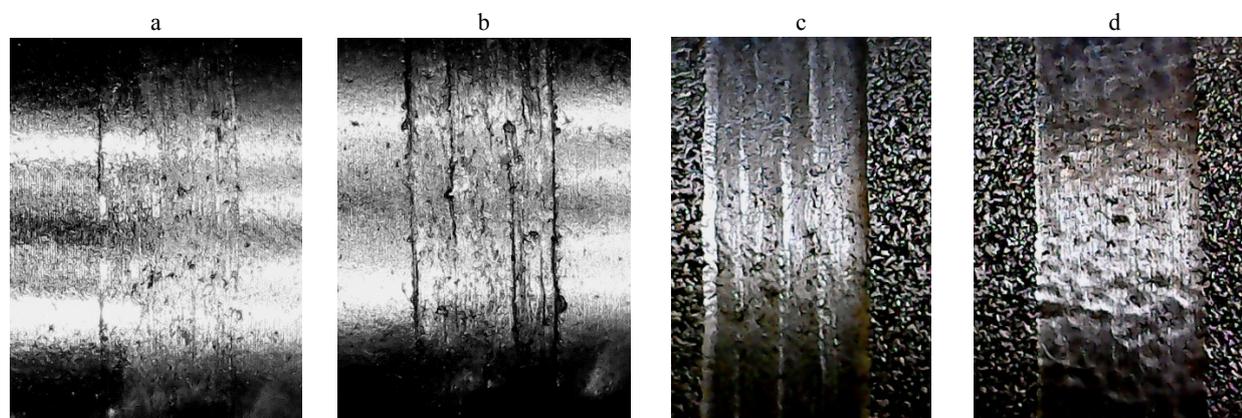


Рис. 7. Поверхности участков образца из спеченного титанового сплава BT1-0 после выглаживания с различными режимами: а – № 1; б – № 2; с – № 3; д – № 4 (×50)

Fig. 7. Surfaces of specimen sections from sintered titanium BT1-0 alloy after burnishing while using various modes: а – No 1; б – No 2; с – No 3; д – No 4 (×50)

Использование индентора малого радиуса при значительной силе приводило к тому, что в точке контакта инструмента с поверхностью образца возникало большое удельное давление, что, в свою очередь, может приводить к резанию и, как следствие, – к разрушению поверхностного слоя.

Анализ результатов, показанных на рис. 7, подтверждает сделанное ранее предположение. Видно (рис. 7b), что увеличение давления приводит к смене режима пластического деформирования поверхностного слоя к его резанию. Кроме этого, сравнивая рис. 7b, d, можно сделать предположение, что большее влияние будет оказывать скорость выглаживания, так как она определяет время воздействия индентора с поверхностью образца.

Визуальный анализ поверхностей после выглаживания всех образцов показывает (рис. 6, 7), что при благоприятных условиях алмазное выглаживание приводит к значительному снижению пористости поверхностного слоя. Вероятно, глубина уплотненного слоя будет определяться сочетанием режимных параметров процесса, физическими и механическими характеристиками обрабатываемого материала, а также параметрами порового пространства поверхностного слоя.

Анализ микрофотографий на рис. 8a показывает наличие большого количества пор в поверхностном слое образца. Применение алмазного выглаживания (рис. 8b) значительно снижает пористость на поверхности образца и приводит к залечиванию тупиковых пор.

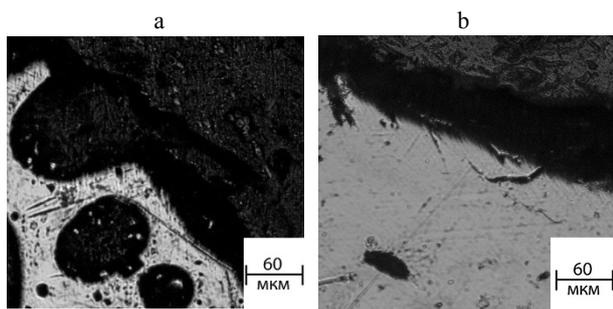


Рис. 8. Микрофотографии поперечного сечения участков образца из сплава LMD OX 45-3:

а – до выглаживания; б – после выглаживания

Fig. 8. Cross section microphotograph of specimen sections from LMD OX 45-3 alloy:

а – before burnishing; б – after burnishing

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что алмазное выглаживание может быть эффективно применено для уплотнения поверхностного слоя изделий из малопластичных некомпактных материалов, полученных различными способами.

2. Оценка результатов, полученных при упрочнении поверхности образцов с разными режимами, говорит о том, что поиск оптимального сочетания режимов упрочнения и геометрии индентора для некомпактных материалов различного класса является актуальной задачей. Ее решение позволит расширить номенклатуру изделий, изготавливаемых с использованием технологий 3D-печати и порошковой металлургии. Дальнейшее выглаживание предварительно уплотненных поверхностей за счет формирования благоприятных остаточных напряжений сжатия и упрочнения поверхностного слоя будет приводить к повышению их эксплуатационных характеристик.

3. Применение технологии алмазного выглаживания в сочетании с аддитивными технологиями селективного лазерного спекания и порошковой металлургии перспективно для широкого спектра изделий таких отраслей, как авиадвигателе- и машиностроение, авиация, приборостроение и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. Манохин, А. И. Развитие порошковой металлургии / А. И. Манохин, М. Х. Шорников. М.: Наука, 1988. 77 с.
2. Назаров, А. П. Типовые образцы изделий, получаемых методом селективного лазерного спекания / А. П. Назаров, А. А. Окунькова // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2012. Т. 67, № 3. С. 76–83.

3. Анциферов, В. Н. Перспективные материалы и технологии порошковой металлургии / В. Н. Анциферов. Пермь: Пермский госуд. техн. ун-т, 2014. 109 с.
4. Егоров, М. С. Технология и особенности изготовления деталей методом порошковой металлургии / М. С. Егоров, Ю. М. Вернигоров, Р. В. Егорова; под общ. ред. М. С. Егорова. Р-на-Д: Изд-во ДГТУ, 2017. 63 с.
5. Effect of Harmonic Structure Design with Bimodal Grain Size Distribution on Near-Threshold Fatigue Crack Propagation in Ti-6Al-4V Alloy / K. Shoichi [et al.] // International Journal of Fatigue. 2016. Vol. 92. P. 616–622. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.02.038>.
6. Павленко, Д. В. Оценка газонасыщения спеченных титановых сплавов, синтезируемых из порошков с применением винтовой экструзии / Д. В. Павленко // Порошковая металлургия. 2017. № 5/6. С. 46–59.
7. 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.
8. Влияние режимов прессования и спекания на пористость спеченных титановых изделий / А. Е. Капустян [и др.] // Обработка материалов давлением. 2015. Т. 41, № 2. С. 221–225.
9. Получение деталей из сплавов титана аддитивными методами / А. А. Скребцов [и др.] // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов. Днепропетровск, 2017. Вып. 95. С. 118–122. (Стародубовские чтения-2017).
10. 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. Т. 125, № 8. С. 11–16.
11. 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.
12. Павленко, Д. В. Повышение технологической пластичности спеченных титановых сплавов / Д. В. Павленко // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. 2015. № 15. С. 102–112.
13. Pavlenko, D. V. Vortices in Noncompact Blanks During Twist Extrusion / D. V. Pavlenko, Ya. E. Beygel'zimer // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2016. Vol. 54, No 9–10. P. 517–524. <https://doi.org/10.1007/s11106-016-9744-9>.
14. Вишнепольский, Е. В. 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.
15. Эльдарзаде, Э. Г. Особенности шлифования деталей из порошковых материалов на основе железа / Э. Г. Эльдарзаде, А. А. Кулиев // Актуальные проблемы гума-

- нитарных и естественных наук. 2016. Т. 1, № 12. С. 154–148.
16. Папшев, Д. Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием / Д. Д. Папшев. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.
 17. Одинцов, Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием / Л. Г. Одинцов. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
 18. Грановский, Э. Г. Измерение износа алмазных выглаживателей / Э. Г. Грановский // Известия вузов. Машиностроение, 1968. № 11. С. 128–131.
 19. Microstructure and Oxide Particle Stability in a Novel ODS γ -TiAl Alloy processed by Spark Plasma Sintering and Laser Additive Manufacturing / C. Kenel [et al.] // *Intermetallics*. 2017. Vol. 90. P. 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2017.07.004>.
 20. Pavlenko, D. V. Effect of Deformation by the Method of Screw Extrusion on the Structure and Properties of BT1-0 Alloy in Different States / D. V. Pavlenko, A. V. Ovchinnikov // *Materials Science*. 2015. Vol. 51, Is. 1. P. 52–60. <https://doi.org/10.1007/s11003-015-9809-9>.
- Поступила 06.02.2018
Подписана в печать 10.04.2018
Опубликована онлайн 30.01.2019
- #### REFERENCES
1. Manokhin A. I., Shornikov M. Kh. (1988) *Development of Powder Metallurgy*. Moscow, Nauka Publ. 77 (in Russian).
 2. Nazarov A. P., Okunkova A. A. (2012) Type Specimens of Products Obtained while Using Method of Selective Laser Sintering. *Vestnik Saratovskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Vestnik Saratov State Technical University*, 67 (3), 76–83 (in Russian).
 3. Antsiferov V. N. (2014) Prospective Materials and Technologies of Powder Metallurgy. Perm, Perm State Technical University. 109 (in Russian).
 4. Egorov M. S., Vernigorov Yu. M., Egorova R. V. (2017) *Technology and Features of Manufacturing Parts by Powder Metallurgy*. Rostov-na-Donu, Don State Technical University. 63 (in Russian).
 5. Shoichi K., Takafumi I., Hiroki K., Yoshikazu N., Mie O., Akira U., Kei A. (2016) 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*, 92, 616–622. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.02.038>.
 6. Pavlenko D. V. (2017) Gas Saturation Assessment of Sintered Titanium Alloy Synthesized from Powder while Using Screw Extrusion. *Poroshkovaya Metallurgiya = Powder Metallurgy*, (5/6), 46–59 (in Russian).
 7. Kablov E. N., Lukin V. I. (2008) Intermetallics Based on Titanium and Nickel for Products Used in New Equipment. *Avtomaticheskaya Svarka = Automatic Welding*, (11), 76–82 (in Russian).
 8. Kapustyan A. E., Ovchinnikov A. V., Pavlov V. V., Shul'ga K. S., Shevchenko V. G. (2015) Influence of Pressing and Sintering Modes on Porosity of Sintered Titanium Products. *Obrabotka Materialov Davleniem: Sbornik Nauchnykh Trudov* [Pressure Material Treatment: Collection of Scientific Papers]. Kramatorsk, 41 (2), 221–225 (in Russian).
 9. Skrebtsov A. A., Ovchinnikov A. V., Shevchenko V. G., Mikhailyutenko O. A., Zhila T. A. (2017) Obtaining Products from Titanium Alloys while Using Additive Methods. *Stroitel'stvo, Materialovedenie, Mashinostroenie: Sb. Nauch. Trudov* [Construction, Material Science, Mechanical Engineering: Collection of Scientific Papers. Starodubovskiy Reading-2017]. Dnepropetrovsk, 95, 118–122 (in Russian).
 10. Petrik I. A., Ovchinnikov A. V., Seliverstov A. G. (2015) Development of Titanium-Alloy Powder for Additive Technologies with Regard to Gas-Turbine Engine Parts. *Aviatsionno-Kosmicheskaya Tehnika i Tehnologiya* [Aviation and Space Equipment and Technology], 125 (8), 11–16 (in Russian).
 11. Pavlenko D. V., Ovchinnikov A. V. (2015) Influence of Deformation on Structure and Properties of BT1-0 Alloy in Various States while Using Method of Screw Extrusion. *Fiziko-Khimichna Mekhanika Materialiv* [Physical and Chemical Mechanics of Materials], (1), 50–57 (in Russian).
 12. Pavlenko D. V. (2015) Increase of technological Plasticity in Sintered Titanium Alloys. *Protsesi Mekhanichnoy Obrobki v Mashinobuduvanni* [Processes of Mechanical Machining in Machine-Building], (15), 102–112 (in Russian).
 13. Pavlenko D. V., Beygel'zimer Ya. E. (2016) Vortices in Noncompact Blanks During Twist Extrusion. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 54 (9–10). 517–524. <https://doi.org/10.1007/s11106-016-9744-9>.
 14. Vishnepol'skii E. V., Pukhal'skaya G. V., Glikson I. L. (2009) Increase of Fatigue Resistance in Stress Concentration Zones of Cylindrical Shells while Using Diamond Burnishing. *Visnik Dvigunobuduvannya = Herald of Aeroenginebuilding*, (1), 90–94 (in Russian).
 15. Eldarzade E. G., Kuliev A. A. (2016) Specific Features in polishing of Parts Made from Powder Materials Based on Iron. *Aktualnye Problemy Gumanitarnykh i Estestvennykh Nauk* [Current Problems of Humanitarian and Natural Sciences], 1 (12), 154–148 (in Russian).
 16. Papshev D. D. (1978) *Finish Machining and Strengthening Treatment while Using Surface Plastic Deformation*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 152 (in Russian).
 17. Odintsov L. G. (1987) *Strengthening and Finishing of Parts while Using Surface Plastic Deformation*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 328 (in Russian).
 18. Granovsky E. G. (1968) Measuring of Wear in Diamond Smoothing Devices. *Izvestiya Vuzov. Mashinostroenie* [News of Higher Educational Institutions], (11), 128–131 (in Russian).
 19. Kenel C., Dawson K., Barras J., Hauser C., Dasargyri G., Bauer T., Colella A., Spierings A. B., Tatlock G. J., Leinenbach C., Wegener K. (2017) Microstructure and Oxide Particle Stability in a Novel ODS γ -TiAl Alloy processed by Spark Plasma Sintering and Laser Additive Manufacturing. *Intermetallics*, 90, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2017.07.004>.
 20. Pavlenko D. V., Ovchinnikov A. V. (2015) Effect of Deformation by the Method of Screw Extrusion on the Structure and Properties of BT1-0 Alloy in Different States. *Materials Science*, 51 (1), 52–60. <https://doi.org/10.1007/s11003-015-9809-9>.

Received: 06.02.2018

Accepted: 10.04.2018

Published online: 30.01.2019