

УДК 621.787, 620.179.18, 621.7.07, 621.789

## Влияние LSPwC на параметры поверхностного слоя лопаток компрессора газотурбинного двигателя из титанового сплава

А.А. Ширяев, И.Г. Габов, А.С. Миленин, Ю.В. Попова

АО «ОДК-Авиадвигатель»

## LSPwC influence on the surface layer parameters of the titanium alloy GTE compressor blades

A.A. Shiryayev, I.G. Gabov, A.S. Milenin, Yu.V. Popova

UEC-Aviadvigatel JSC

Наиболее часто применяемое для повышения прочности и стойкости пера лопатки газотурбинного двигателя гидродробеструйное упрочнение создает благоприятную эпюру остаточных сжимающих напряжений на его поверхности. Однако их глубина составляет не более 0,2 мм, чего недостаточно для обеспечения требуемого уровня усталостной прочности лопатки при повреждении кромок вследствие попадания в них посторонних предметов на глубину до 1,0 мм. Для повышения стойкости лопаток рассмотрено перспективное лазерное ударное упрочнение без защитного покрытия (Laser Shock Peening without Cover — LSPwC). На примере титановой лопатки первого каскада компрессора газотурбинного двигателя исследовано влияние такого метода упрочнения на геометрические параметры и поверхностный слой пера лопатки. Лазерному ударному упрочнению без защитного покрытия подвергали зону кромок пера лопатки шириной 5 мм. Установлено, что поверхность пера лопатки после упрочнения не удовлетворяет требованиям конструкторской документации по шероховатости. Необходимо вводить финишную обработку поверхности, чтобы убрать оплавленный слой глубиной 2...6 мкм. Участки оплавления расположены преимущественно по центру пятен от лазерного удара. Оплавление поверхности сопровождалось множественным растрескиванием. Под оплавленным слоем микроструктурных изменений не обнаружено. Глубина сжимающих остаточных напряжений превышала 0,3 мм, что больше, чем при гидродробеструйной обработке. Упрочнение кромок пера лопатки привело к ее деформации, которая увеличивалась от хвостовика к вершине лопатки. Наибольшая деформация наблюдалась на задней кромке и периферийной зоне лопатки. В связи с этим необходимо продолжить отработку режимов упрочнения для соответствия требованиям конструкторской документации.

EDN: JEEASU, <https://elibrary/jeeasu>

**Ключевые слова:** лазерное ударное упрочнение, шероховатость поверхности лопаток, остаточные сжимающие напряжения, морфология поверхности, титановый сплав, деформация лопатки

Hydro-shot peening is most often used to increase strength and durability of the gas turbine engine blade airfoils and creates a favorable diagram of the residual compressive stresses on its surface. However, their depth is no more than 0.2 mm, which is not sufficient to ensure the required level of the blade fatigue strength with the edges damaged by foreign objects entering to a depth of 1.0 mm. To increase the blades' durability, the paper considers the la-

ser shock peening without coating (LSPwC). Using an example of the titanium blade of the gas turbine engine compressor first stage, it studies the influence of this peening method on the blade airfoil geometric characteristics and surface layer. The blade airfoil edge section with the width of 5 mm was subjected to LSPwC. It was established that the blade airfoil surface after hardening was not meeting requirements of the design documentation in roughness. It became necessary to introduce the finishing surface treatment to remove the melted layer with a depth of 2 to 6 microns. Melting areas were located mainly in the center of the laser shock spots. Surface melting was accompanied by multiple cracking. No microstructural alterations were found under the melted layer. Depth of the compressive residual stresses was not exceeding 0.3 mm, which was superior to the hydro-shot peening. Peening the blade airfoil edge led to its deformation, which was increasing from the tail to the blade tip. The most significant deformation was observed at the blade's trailing edge and peripheral zone. In this regard, it is required to continue developing the peening modes to meet the design documentation requirements.

EDN: JEEASU, <https://elibrary/jeeasu>

**Keywords:** laser shock, laser shock peening, blade surface roughness, residual compressive stresses, surface morphology, titanium alloy, blade deformation

Рабочие лопатки и роторные детали в значительной мере определяют эксплуатационные характеристики авиационных газотурбинных двигателей (ГТД). Лопатки в процессе эксплуатации подвержены циклическим (мало- и многоцикловой усталости), термическим и статическим (центробежным и газодинамическим) нагрузкам. Помимо циклических нагрузок лопатки и проточная часть ГТД могут быть повреждены попадающими в них посторонними предметами, такими как лед, песок, птицы, мусор на взлетно-посадочной полосе.

Предметы, попавшие в проточную часть ГТД, повреждают лопатки каскада как низкого давления, так и высокого. Результаты взаимодействия предметов, попавших в проточную часть ГТД, с рабочими лопатками выражаются в появлении забоин по кромкам, перу и антивибрационным полкам (при наличии) лопаток, а также в деформациях кромок, обрывах, отгибах периферийных частей, которые нелинейно распределяются по длине тракта (ступеням).

Для увеличения стойкости лопаток к повреждениям необходимо повысить предел выносливости различными методами упрочняющей обработки: обкаткой шариками и роликами, дробеструйным или ультразвуковым упрочнением шариками, лазерным ударным упрочнением, упрочнением электронными и ионными пучками [1–9].

Цель работы — исследование влияния лазерного ударного упрочнения без абляционного слоя на уровень остаточных напряжений (ОН), геометрические параметры и микроструктуру лопаток ГТД.

Указанный метод создает благоприятную эпюру ОН на поверхности пера лопатки и позволяет увеличить предел выносливости до 19 %. Однако при таком методе упрочнения глубина сжимающих ОН не превышает 0,2 мм, чего недостаточно для обеспечения требуемого уровня усталостной прочности лопаток при повреждении кромок типа забоины вследствие попадания посторонних предметов на глубину до 1 мм.

Лазерное ударное упрочнение (LSP) — это перспективная технология обработки поверхности, достоинством которой являются высокие сжимающие ОН на большую глубину в материале, что позволяет увеличить усталостную долговечность [10–19]. В основу метода лазерной обработки положено создание плазмы ионизированного газа под высоким давлением. Это приводит к генерации ударных волн высокого давления, вызывающих сжатие поверхности рабочего материала мишени. Хотя ударные волны вызывают сжимающее напряжение, оно должно достигать предела упругости материала Гюгонио, чтобы он подвергся пластической деформации [19].

Практическое применение этой технологии требует разработки математической модели, и такие работы активно ведутся [20–25]. Для моделирования LSP используют конечно-элементный пакет Abaqus. Для верификации математических моделей выполняют сравнение результатов расчета профиля ОН при одиночном ударе с экспериментальными данными. Схема процесса и метод моделирования показаны на рис. 1.

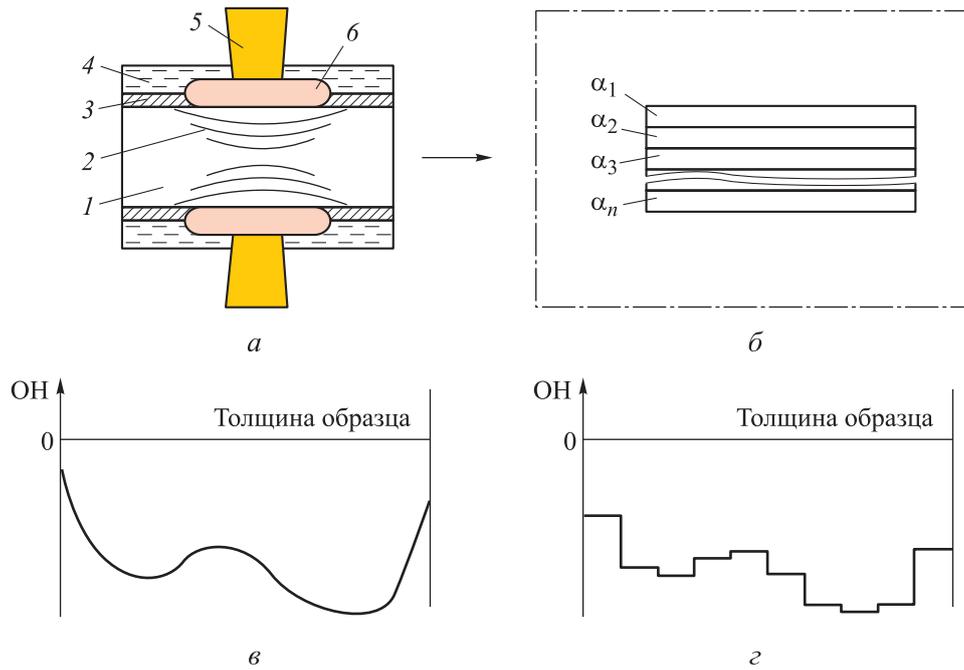


Рис. 1. Лазерное ударное упрочнение образца:  
 а — схема процесса (1 — упрочняемый образец; 2 — ударные волны; 3 — поглощающий слой (фольга); 4 — ограничивающий слой (вода); 5 — лазерный луч; 6 — плазма); б — схема разделения упрочняемого образца на слои с коэффициентами температурного расширения  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$ ; в и г — распределение ОН по толщине образца

Разновидностью LSP является обработка низкоэнергетическим лазером с энергией до 1 Дж без использования защитного слоя — LSPwC. Для низкоэнергетического лазерного упрочнения нет необходимости в абляционном слое, так как можно избежать проблем плавления и повторного затвердевания поверхности путем настройки параметров лазера [26–28].

В работе [29] проведено сравнение выглаживания и LSP (с покрытием и без покрытия) сплава Ti-6Al-4V путем испытаний на мало- и многоцикловую усталость в условиях внешней среды и повышенной температуры. LSP (как с покрытием, так и без него) обеспечивает несколько больший срок эксплуатации, чем выглаживание при температуре 22...450 °C.

**Методика проведения эксперимента. Образцы и оборудование.** Для оценки эффективности упрочнения LSPwC выбран объект — титановая лопатка первого каскада компрессора ГТД, эскиз которой показан на рис. 2.

Упрочнению подвергали зоны кромок, так как они в первую очередь подвергаются повреждениям от попадания посторонних предметов (льда, песка, птиц, мусора на взлетно-посадочной полосе и др.). Согласно статистическим

данным, чаще всего встречаются повреждения на входной кромке лопаток глубиной до 1 мм, реже — до 3...4 мм. Чтобы исключить или замедлить рост трещины от повреждения, ширина зоны упрочнения  $L$  должна составлять 5 мм (см. рис. 2).

Упрочняющую обработку проводили твердотельным Nd:YAG лазером с длиной волны 1060 нм и энергией импульса до 1 Дж без защитного слоя. Схема закрепления образца

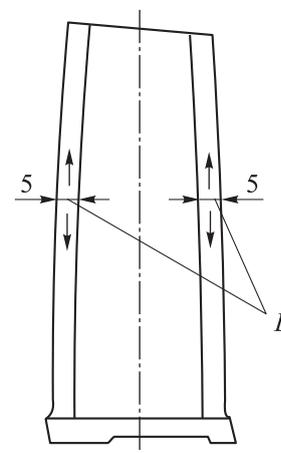


Рис. 2. Эскиз титановой лопатки первого каскада компрессора ГТД с зонами упрочнения кромок пера

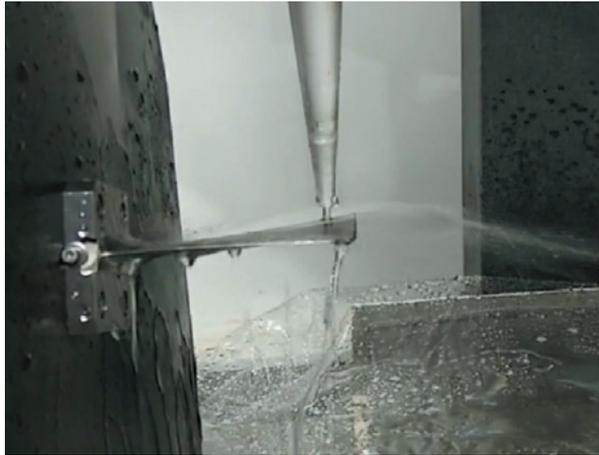


Рис. 3. Схема закрепления образца в процессе обработки

лопатки в процессе обработки показана на рис. 3.

К упрочнению LSPwC сформировали следующие требования:

- неухудшение предела выносливости;
- обеспечение благоприятной эпюры ОН на глубину до 1 мм;
- повышение предела выносливости лопаток с забоиной;
- неухудшение геометрических параметров и поверхностного слоя (шероховатости).

Сформированные требования к упрочнению LSPwC обусловлены тем, чтобы не допустить снижения коэффициента полезного действия и параметров ГТД.

Морфологию поверхности образцов после обработки определяли с помощью микроскопа MIRA3 TESCAN, степень наклепа и микротвердости — с использованием прибора для их измерения.

Определение ОН проводили методом Давиденкова с помощью установки АПООН.

Изменение деформаций до и после упрочнения находили с помощью координатно-измерительной машины SIRUI CMM. Для измерения шероховатости поверхности применяли оптический профилометр ZYGO 3D.

**Результаты эксперимента.** После упрочнения в лопатках определяли шероховатость поверхности, уровень ОН, микроструктуру и геометрические параметры.

*Шероховатость поверхности.* Этот параметр измеряли в десяти точках на кромках лопаток с обеих сторон, приняв за 100 % ее значение, указанное в конструкторской документа-



Рис. 4. Значения шероховатости поверхности лопаток после упрочнения LSPwC (■) и по требованиям КД (—)

ции (КД). Полученные результаты приведены на рис. 4, где видно, что упрочнение LSPwC не удовлетворяет требованиям КД по шероховатости. Операцию упрочнения не следует рассматривать как финишную, необходимо провести полировку поверхности.

*Геометрические параметры.* Схема сечений и расстояния от замка лопатки показаны на рис. 5. Порядковые номера CV-1...CV-7 находятся на выпуклой стороне лопатки (спинке), CC-1...CC-7 — на ее вогнутой стороне (корыте).

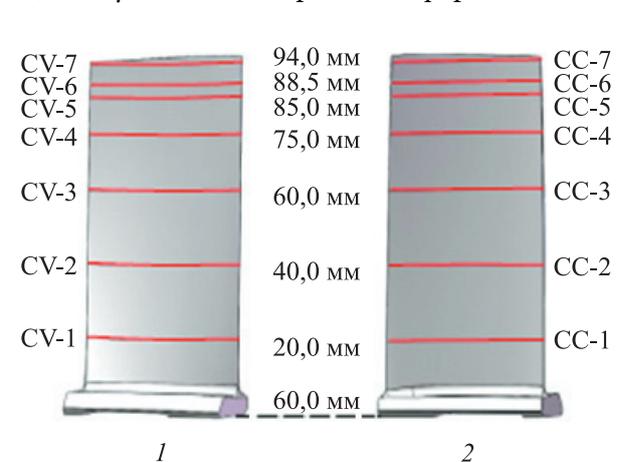


Рис. 5. Схема измерения деформаций в спинке (1) и корыте (2) лопатки

**Результаты измерения деформаций элементов лопатки**

Номер образца	Деформация, мм	
	корыта	спинки
1	1,619	1,683
2	1,422	1,440
3	1,622	1,648
4	1,682	1,679
5	1,538	1,557

ментов лопатки приведены в таблице. Среднее значение деформации составило 1,589 мм.

Деформация лопатки направлена в сторону спинки, увеличиваясь от хвостовика к периферийной зоне. Наибольшая деформация наблюдается на задней кромке и периферийной зоне лопатки, составляя 1,619 мм на спинке и 1,683 мм на корыте. Тенденции деформации остальных лопаток такие же, как показано на рис. 6.

*Остаточные напряжения.* Уровень ОН определяли методом Давиденкова на кромках спинки и корыта. Направление ОН показано на рис. 2. Полученные результаты приведены на рис. 7. За минус единицу принят макси-

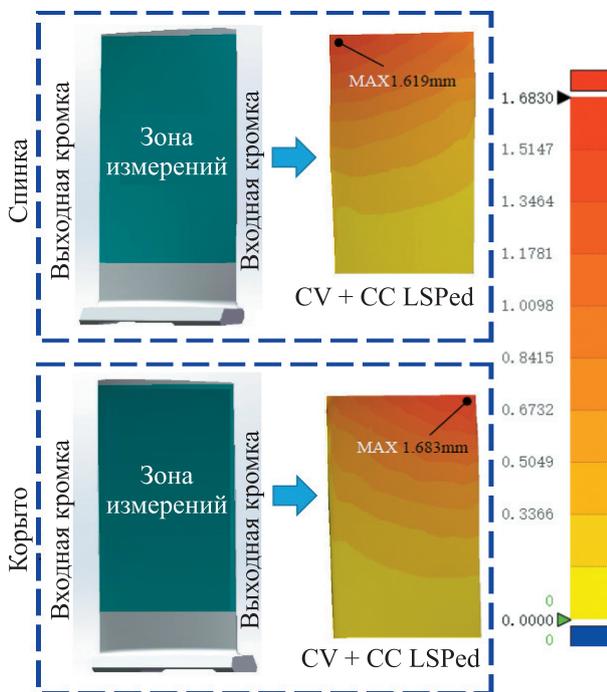


Рис. 6. Диаграмма деформационного облака для лопатки

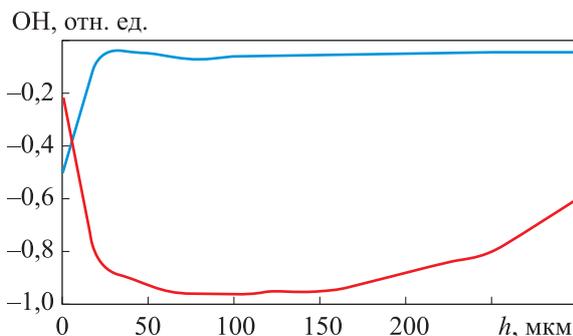


Рис. 7. Распределение по глубине  $h$  ОН для исходных (—) и упрочненных лопаток (—)

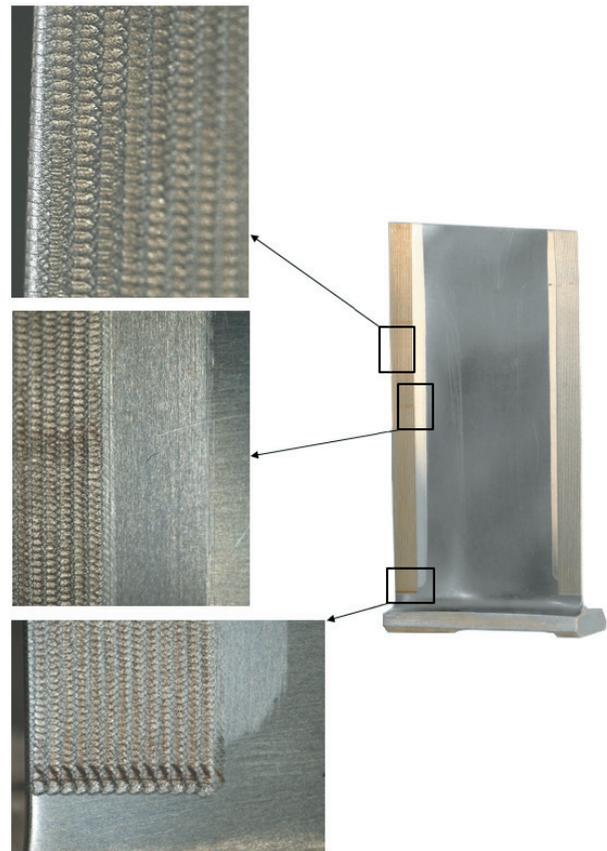


Рис. 8. Внешний вид поверхности лопатки после LSPwC

мальный уровень ОН в лопатках после упрочнения.

Глубина сжимающих ОН после упрочнения превысила 0,3 мм. При LSPwC уровень сжимающих ОН на глубине  $h = 0...100$  мкм резко снижается, достигает максимума при  $h = 100$  мкм и затем плавно уменьшается до 300 мкм.

*Микроструктура и поверхность лопаток.* Внешний вид поверхности лопатки и микротрещин в ее оплавленном слое после LSPwC показан на рис. 8 и 9, а рельеф поверхности и микроструктура — на рис. 10, а–в.

Осмотр поверхности образцов с помощью электронной микроскопии показал, что по местам упрочнения LSPwC на всех образцах имеется оплавленный слой глубиной 2...6 мкм (см. рис. 10, а–в). Участки оплавления расположены преимущественно по центру пятен от лазерного удара. оплавление поверхности сопровождается множественным растрескиванием (см. рис. 10, в). Трещины за пределы оплавленного слоя в материал образцов развития не имеют. Под оплавленным слоем микроструктурных изменений не обнаружено.

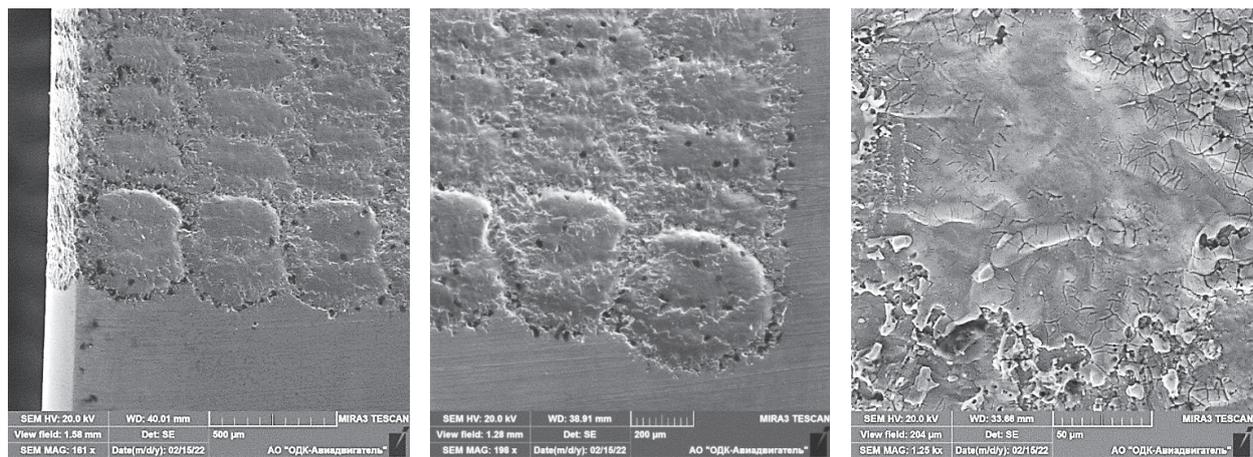


Рис. 9. Внешний вид микротрещин в оплавленном слое лопатки после LSPwC

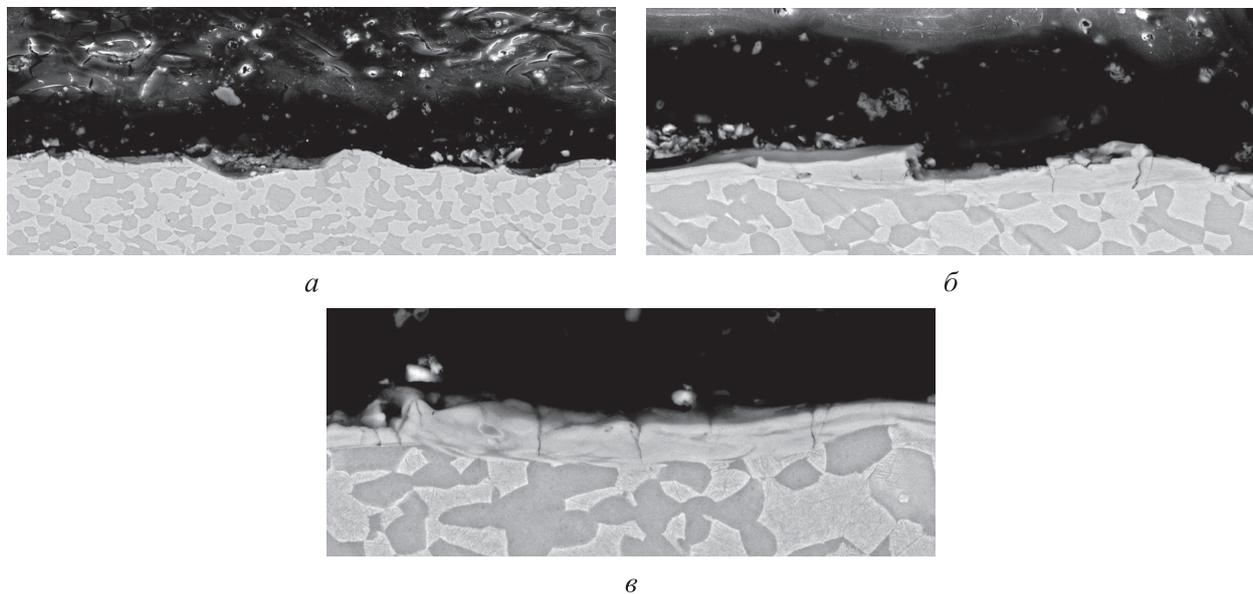


Рис. 10. Результаты осмотра поверхности образцов с помощью электронной микроскопии в зоне лазерного ударного упрочнения кромки:

*а* и *б* — рельеф поверхности и микроструктура поверхности на поперечном микрошлифе;  
*в* — микроструктура поверхности на продольном микрошлифе

## Выводы

1. Шероховатость после упрочнения LSPwC не удовлетворяет требованиям КД. Операцию упрочнения не следует рассматривать как финишную, необходимо ввести полировку поверхности, чтобы удалить оплавленный слой.

2. Осмотр поверхности образцов с помощью электронной микроскопии показал, что по местам упрочнения методом лазерного удара на всех образцах имеется оплавленный слой глубиной 2...6 мкм. Участки оплавления расположены преимущественно по центру пятен от лазерного удара. Оплавление поверхности сопро-

вождается множественным растрескиванием. Трещины за пределы оплавленного слоя в материал образцов развития не имеют.

3. Показана принципиальная возможность наведения сжимающих ОН глубиной более 0,3 мм методом лазерного удара. Следует продолжить отработку указанной технологии с целью выполнения требований к упрочнению.

4. Технология упрочнения LSPwC не удовлетворяет требованиям по неухудшению геометрических параметров. Необходимо провести отработку режима упрочнения и ввести дополнительную обработку пера лопаток.

## Литература

- [1] Тамаркин М.А., Шведова А.С., Гребенкин Р.В. и др. Технологическое обеспечение заданного качества поверхностного слоя деталей при обработке динамическими методами поверхностного пластического деформирования. *Вестник ДГТУ*, 2016, № 3, с. 46–52, doi: <https://doi.org/10.12737/20220>
- [2] Шведова А.С. Повышение эксплуатационных свойств деталей при обработке динамическими методами поверхностного пластического деформирования. *Вестник ДГТУ*, 2015, № 1, с. 114–120, doi: <https://doi.org/10.12737/10394>
- [3] Папшева Н.Д. Методы алмазного выглаживания деталей машин и инструментов. *Современные проблемы теории машин*, 2016, № 4–2, с. 102–104.
- [4] Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Лебеденко В.Г. Повышение качества поверхностного слоя деталей при обработке поверхностным пластическим деформированием в гибких гранулированных средах. *Вестник ДГТУ*, 2009, т. 9, № 3, с. 469–480.
- [5] Коновалов Л.И., Ширваньянц Г.Г. Метод ультразвукового упрочнения поверхностей узлов и деталей авиационных газотурбинных двигателей, как одна из перспективных технологий в авиастроении. *Молодой ученый*, 2015, № 22, с. 141–147.
- [6] Ширяев А.А., Трофимов В.Н., Винокуров Н.В. и др. Влияние лазерной и механической упрочняющей обработки на свойства поверхностного слоя. *Математическое моделирование в естественных науках*, 2018, т. 1, с. 340–342.
- [7] Ширяев А.А., Виндокуров Д.В., Трофимов В.Н. и др. Влияние параметров ультразвуковой дробеструйной обработки на физико-механические свойства поверхностного слоя образцов из сталей 08пс и 12Х18Н10Т. *Математическое моделирование в естественных науках*, 2019, т. 1, с. 181–184.
- [8] Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. *Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин*. Москва, Машиностроение, 1988. 240 с.
- [9] Ляховецкий М.А., Королев Д.Д., Кожевников Г.Д. и др. Лазерное ударное упрочнение титанового сплава ВТ6 с алюминиевым абляционным покрытием. *Быстрозакаленные материалы и покрытия. Межд. науч.-тех. конф.* Москва, Пробел, 2021, с. 258–263.
- [10] Keller S., Chupakhin S., Staron P. et al. Experimental and numerical investigation of residual stresses in laser shock peened AA2198. *J. Mater. Process. Technol.*, 2018, vol. 255, pp. 294–307, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.11.023>
- [11] Ebrahimi M., Amini S., Seyed M. The investigation of laser shock peening effects on corrosion and hardness properties of ANSI 316L stainless steel. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2017, vol. 88, no. 5–8, pp. 1557–1565, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8873-0>
- [12] Горунов А.И., Гильмутдинов А.Х. Упрочнение и наплавка волоконным лазером как способы целенаправленного формирования структуры и свойств титанового сплава ВТ6. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*, 2015, № 4, с. 40–44, doi: <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2015-4-40-44>
- [13] Муратаев Ф.И., Клабуков М.А. Особенности лазерного ударного упрочнения сталей и титановых сплавов. *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*, 2012, № 4–2, с. 82–84.
- [14] Sundar R., Ganesh P., Maravi S. et al. Study on effect of laser shock peening as a pre-treatment on fatigue performance of hard-chrome plated 15–5 PH stainless steel. *Lasers Manuf. Mater. Process.*, 2019, vol. 6, no. 4–6, pp. 85–97, doi: <https://doi.org/10.1007/s40516-019-0082-x>
- [15] Kumar G.R., Rajyalakshmi G., Swaroop S. et al. Laser shock peening wavelength conditions for enhancing corrosion behaviour of titanium alloy in chloride environment. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 2019, vol. 41, no. 3, art. 129, doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1633-y>
- [16] Sundar R., Ganesh P., Ram K.G. et al. Laser shock peening and its applications: a review. *Lasers Manuf. Mater. Process.*, 2019, vol. 6, no. 4, pp. 424–463, doi: <https://doi.org/10.1007/s40516-019-00098-8>
- [17] Jiang X.P., Man C.S., Shepard M.J. et al. Effects of shot-peening and re-shot-peening on four-point bend fatigue behavior of Ti–6Al–4V. *Mater. Sci. Eng. A.*, 2007, vol. 468–470, pp. 137–143, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.01.156>
- [18] Altenberger I., Nalla R.K., Sano Y. On the effect of deep-rolling and laser-peening on the stress-controlled low- and high-cycle fatigue behavior of Ti–6Al–4V at elevated temperatures up to 550 °C. *Int. J. Fatigue*, 2012, no. 44, pp. 292–302, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.03.008>

- [19] Шиганов И.Н., Мельников Д.М., Мьят З.Й. Лазерное ударное упрочнение алюминиевых материалов. *Лазеры в науке, технике, медицине. Сб. науч. тр. межд. конф.*, т. 28, Москва, МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2017, с. 43–47.
- [20] Гачегова Е.А., Плехов О.А., Изюмова А.Ю. и др. Моделирование остаточных напряжений после лазерной ударной проковки. *Математическое моделирование в естественных науках*, 2021, т. 1, с. 135–137.
- [21] Плехов О.А., Костина А.А., Изюмов Р.И. и др. Конечно-элементный анализ остаточных напряжений, возникающих в результате лазерной ударной проковки титанового сплава ВТ6. *Вычислительная механика сплошных сред*, 2022, т. 15, № 2, с. 171–184, doi: <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2022.15.2.13>
- [22] Сихамов Р.А., Фомин Ф., Келлер З. и др. Моделирование остаточных напряжений, созданных методом лазерного ударного упрочнения. *Аллея науки*, 2019, т. 2, № 6. URL: [https://alley-science.ru/domains\\_data/files/04june2019/modelirovanie%20ostatochnyh%20napryazheniy,%20sozdannyh%20metodom%20lazernogo%20udarnogo%20uprochneniya.pdf](https://alley-science.ru/domains_data/files/04june2019/modelirovanie%20ostatochnyh%20napryazheniy,%20sozdannyh%20metodom%20lazernogo%20udarnogo%20uprochneniya.pdf)
- [23] Kim J.H., Kim Y.J., Kim J.S. Effects of simulation parameters on residual stresses for laser shock peening finite element analysis. *J. Mech. Sci. Technol.*, 2013, vol. 27, no. 7, pp. 2025–2034, doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-012-1263-0>
- [24] Kim J.H., Kim Y.J., Lee J.W. et al. Study on effect of time parameters of laser shock peening on residual stresses using FE simulation. *J. Mech. Sci. Technol.*, 2014, vol. 28, no. 5, pp. 1803–1810, doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-014-0327-8>
- [25] Sakhvadze G.Zh. Simulation of the technology of laser-shock-wave processing of titanium alloys with shape memory using dimensional analysis. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2021, vol. 50, no. 4, pp. 332–341, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618821040130>
- [26] Sano Y., Akita K., Masaki K. et al. Laser peening without coating as a surface enhancement technology. *J. Laser Micro Nanoeng.*, 2006, vol. 1, no. 3, pp. 161–166, doi: <http://dx.doi.org/10.2961/jlmm.2006.03.0002>
- [27] Sathyajith S., Kalainathan S. Effect of laser shot peening on precipitation hardened aluminum alloy 6061-T6 using low energy laser. *Opt. Laser Eng.*, 2012, vol. 50, no. 3, pp. 345–348, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2011.11.002>
- [28] Sathyajith S., Kalainathan S., Swaroop S. Laser peening without coating on aluminum alloy Al-6061-T6 using low energy Nd:YAG laser. *Opt. Laser Tehnol.*, 2013, no. 45, pp. 389–394, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.06.019>
- [29] Altenberger I., Nalla R.K., Sano Y. et al. On the effect of deep-rolling and laser-peening on the stress-controlled low- and high-cycle fatigue behavior of Ti-6Al-4V at elevated temperatures up to 550 °C. *Int. J. Fatigue*, 2012, no. 44, pp. 292–302, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.03.008>

## References

- [1] Tamarkin M.A., Shvedova A.S., Grebenkin R.V. et al. Engineering support for specified quality of parts surface layer under dynamic methods processing of surface plastic deformation. *Vestnik DGTU [Vestnik of DSTU]*, 2016, no. 3, pp. 46–52, doi: <https://doi.org/10.12737/20220> (in Russ.).
- [2] Shvedova A.S. Improvement of part service properties under surface plastic deformation treatment by dynamic methods. *Vestnik DGTU [Vestnik of DSTU]*, 2015, no. 1, pp. 114–120, doi: <https://doi.org/10.12737/10394> (in Russ.).
- [3] Papsheva N.D. Methods of diamond smoothing of machine parts and tools. *Sovremennye problemy teorii mashin*, 2016, no. 4–2, pp. 102–104. (In Russ.).
- [4] Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Lebedenko V.G. Improvement of quality of the blanket of details at processing by superficial plastic deformation in the flexible granulated environments. *Vestnik DGTU [Vestnik of DSTU]*, 2009, vol. 9, no. 3, pp. 469–480. (In Russ.).
- [5] Kononov L.I., Shirvanyants G.G. Method of ultrasonic hardening of assemblies surfaces and parts of aviation gas turbine engines as one of the promising technologies in aircraft construction. *Molodoy uchenyy [Young Scientist]*, 2015, no. 22, pp. 141–147. (In Russ.).
- [6] Shiryaev A.A., Trofimov V.N., Vinokurov N.V. et al. Influence of laser and mechanical hardening treatment on surface layer properties. *Matematicheskoe modelirovanie v estestvennykh naukach*, 2018, vol. 1, pp. 340–342. (In Russ.).

- [7] Shiryaev A.A., Vindokurov D.V., Trofimov V.N. et al. Influence of ultrasonic blasting parameters on physical and mechanical properties of the surface layer of samples from 08ps and 12X18N10T steels. *Matematicheskoe modelirovanie v estestvennykh naukakh*, 2019, vol. 1, pp. 181–184. (In Russ.).
- [8] Sulima A.M., Shulov V.A., Yagodka Yu.D. *Poverkhnostnyy sloy i ekspluatatsionnye svoystva detaley mashin* [Surface layer and operational properties of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 240 p. (In Russ.).
- [9] Lyakhovetskiy M.A., Korolev D.D., Kozhevnikov G.D. et al. [Laser shock hardening of titanium alloy BT6 with aluminium ablative coating]. *Bystrozakalennyye materialy i pokrytiya. Mezhd. nauch.-tekh. konf.* [Rapidly Hardened Materials and Coatings. Proc. Sci.-Tech. Conf.]. Moscow, Probel Publ., 2021, pp. 258–263. (In Russ.).
- [10] Keller S., Chupakhin S., Staron P. et al. Experimental and numerical investigation of residual stresses in laser shock peened AA2198. *J. Mater. Process. Technol.*, 2018, vol. 255, pp. 294–307, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.11.023>
- [11] Ebrahimi M., Amini S., Seyed M. The investigation of laser shock peening effects on corrosion and hardness properties of ANSI 316L stainless steel. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2017, vol. 88, no. 5-8, pp. 1557–1565, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8873-0>
- [12] Gorunov A.I., Gilmutdinov A.Kh. Hardening and welding with a fiber laser as the methods of purposeful formation of the structure and properties of VT6 titanium alloy. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnye pokrytiya* [Powder Metallurgy and Functional Coatings], 2015, no. 4, pp. 40–44, doi: <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2015-4-40-44> (in Russ.).
- [13] Murataev F.I., Klabukov M.A. Features of laser shock hardening steels titanium alloys. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva* [Vestnik of KNRTU n.a. A.N. Tupolev], 2012, no. 4–2, pp. 82–84. (In Russ.).
- [14] Sundar R., Ganesh P., Maravi S. et al. Study on effect of laser shock peening as a pre-treatment on fatigue performance of hard-chrome plated 15–5 PH stainless steel. *Lasers Manuf. Mater. Process.*, 2019, vol. 6, no. 4–6, pp. 85–97, doi: <https://doi.org/10.1007/s40516-019-0082-x>
- [15] Kumar G.R., Rajyalakshmi G., Swaroop S. et al. Laser shock peening wavelength conditions for enhancing corrosion behaviour of titanium alloy in chloride environment. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 2019, vol. 41, no. 3, art. 129, doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1633-y>
- [16] Sundar R., Ganesh P., Ram K.G. et al. Laser shock peening and its applications: a review. *Lasers Manuf. Mater. Process.*, 2019, vol. 6, no. 4, pp. 424–463, doi: <https://doi.org/10.1007/s40516-019-00098-8>
- [17] Jiang X.P., Man C.S., Shepard M.J. et al. Effects of shot-peening and re-shot-peening on four-point bend fatigue behavior of Ti–6Al–4V. *Mater. Sci. Eng. A.*, 2007, vol. 468–470, pp. 137–143, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.01.156>
- [18] Altenberger I., Nalla R.K., Sano Y. On the effect of deep-rolling and laser-peening on the stress-controlled low- and high-cycle fatigue behavior of Ti–6Al–4V at elevated temperatures up to 550 °C. *Int. J. Fatigue*, 2012, no. 44, pp. 292–302, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.03.008>
- [19] Shiganov I.N., Melnikov D.M., Myat Z.Y. [Laser shock hardening of aluminium materials]. *Lazery v nauke, tekhnike, meditsine. Sb. nauch. tr. mezhd. konf. T. 28* [Lasers in Science, Technology, Medicine. Proc. Int. Conf. Vol. 28]. Moscow, MNTORES im. A.S. Popova Publ., 2017, pp. 43–47. (In Russ.).
- [20] Gachegova E.A., Plekhov O.A., Izyumova A.Yu. et al. Modelling of residual stresses after laser shock forging. *Matematicheskoe modelirovanie v estestvennykh naukakh*, 2021, vol. 1, pp. 135–137. (In Russ.).
- [21] Plekhov O.A., Kostina A.A., Izyumov R.I. et al. Finite-element analysis of residual stresses in the TC4 titanium alloy treated by laser shock peening. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred* [Computational Continuum Mechanics], 2022, vol. 15, no. 2, pp. 171–184, doi: <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2022.15.2.13> (in Russ.).
- [22] Sikhonov R.A., Fomin F., Keller Z. et al. Modelling of residual stresses created by laser shock hardening method. *Alleya nauki*, 2019, vol. 2, no. 6. URL: [https://alley-science.ru/domains\\_data/files/04june2019/modelirovanie%20ostatochnykh%20napryazheniy,%20sozdannykh%20metodom%20lazernogo%20udarnogo%20uprochneniya.pdf](https://alley-science.ru/domains_data/files/04june2019/modelirovanie%20ostatochnykh%20napryazheniy,%20sozdannykh%20metodom%20lazernogo%20udarnogo%20uprochneniya.pdf) (in Russ.).

- [23] Kim J.H., Kim Y.J., Kim J.S. Effects of simulation parameters on residual stresses for laser shock peening finite element analysis. *J. Mech. Sci. Technol.*, 2013, vol. 27, no. 7, pp. 2025–2034, doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-012-1263-0>
- [24] Kim J.H., Kim Y.J., Lee J.W. et al. Study on effect of time parameters of laser shock peening on residual stresses using FE simulation. *J. Mech. Sci. Technol.*, 2014, vol. 28, no. 5, pp. 1803–1810, doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-014-0327-8>
- [25] Sakhvadze G.Zh. Simulation of the technology of laser-shock-wave processing of titanium alloys with shape memory using dimensional analysis. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2021, vol. 50, no. 4, pp. 332–341, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618821040130>
- [26] Sano Y., Akita K., Masaki K. et al. Laser peening without coating as a surface enhancement technology. *J. Laser Micro Nanoeng.*, 2006, vol. 1, no. 3, pp. 161–166, doi: <http://dx.doi.org/10.2961/jlmn.2006.03.0002>
- [27] Sathyajith S., Kalainathan S. Effect of laser shot peening on precipitation hardened aluminum alloy 6061-T6 using low energy laser. *Opt. Laser Eng.*, 2012, vol. 50, no. 3, pp. 345–348, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2011.11.002>
- [28] Sathyajith S., Kalainathan S., Swaroop S. Laser peening without coating on aluminum alloy Al-6061-T6 using low energy Nd:YAG laser. *Opt. Laser Tehnol.*, 2013, no. 45, pp. 389–394, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.06.019>
- [29] Altenberger I., Nalla R.K., Sano Y. et al. On the effect of deep-rolling and laser-peening on the stress-controlled low- and high-cycle fatigue behavior of Ti-6Al-4V at elevated temperatures up to 550 °C. *Int. J. Fatigue*, 2012, no. 44, pp. 292–302, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.03.008>

Статья поступила в редакцию 13.09.2023

## Информация об авторах

**ШИРЯЕВ Алексей Александрович** — инженер КО-2993. АО «ОДК-Авиадвигатель» (614990, Пермь, Российская Федерация, Комсомольский пр-т, д. 93, e-mail: [shiryayev-aal@avid.ru](mailto:shiryayev-aal@avid.ru)).

**ГАБОВ Иван Григорьевич** — начальник отделения 299. АО «ОДК-Авиадвигатель» (614990, Пермь, Российская Федерация, Комсомольский пр-т, д. 93, e-mail: [gabov-ig@avid.ru](mailto:gabov-ig@avid.ru)).

**МИЛЕНИН Артем Сергеевич** — начальник отдела КО-2993. АО «ОДК-Авиадвигатель» (614990, Пермь, Российская Федерация, Комсомольский пр-т, д. 93, e-mail: [milenin-as@avid.ru](mailto:milenin-as@avid.ru)).

**ПОПОВА Юлия Владимировна** — начальник бюро металлографических исследований. АО «ОДК-Авиадвигатель» (614990, Пермь, Российская Федерация, Комсомольский пр-т, д. 93, e-mail: [yropova@avid.ru](mailto:yropova@avid.ru)).

## Information about the authors

**SHIRYAEV Aleksey Aleksandrovich** — Engineer, Department КО-2993. JSC UEC-Aviadvigatel (614990, Perm, Russian Federation, Komsomolskiy Ave., Bldg. 93, e-mail: [shiryayev-aal@avid.ru](mailto:shiryayev-aal@avid.ru)).

**GABOV Ivan Grigorievich** — Head of Department 299. JSC UEC-Aviadvigatel (614990, Perm, Russian Federation, Komsomolskiy Ave., Bldg. 93, e-mail: [gabov-ig@avid.ru](mailto:gabov-ig@avid.ru)).

**MILENIN Artem Sergeevich** — Head of Department КО-2993. JSC UEC-Aviadvigatel (614990, Perm, Russian Federation, Komsomolskiy Ave., Bldg. 93, e-mail: [milenin-as@avid.ru](mailto:milenin-as@avid.ru)).

**POPOVA Yuliya Vladimirovna** — Head, Bureau of Metallographic Research. JSC UEC-Aviadvigatel (614990, Perm, Russian Federation, Komsomolskiy Ave., Bldg. 93, e-mail: [yropova@avid.ru](mailto:yropova@avid.ru)).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ширяев А.А., Габов И.Г., Миленин А.С., Попова Ю.В. Влияние LSPwC на параметры поверхностного слоя лопаток компрессора газотурбинного двигателя из титанового сплава. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 3, с. 32–41.

### Please cite this article in English as:

Shiryayev A.A., Gabov I.G., Milenin A.S., Popova Yu.V. LSPwC influence on the surface layer parameters of the titanium alloy GTE compressor blades. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 3, pp. 32–41.