

УДК 621.787, 620.179, 621.789

Влияние плотности мощности лазерной ударной обработки на глубину и уровень остаточных напряжений в образцах из титанового сплава

А.А. Ширияев¹, А.С. Миленин¹, В.В. Карманов²,
О.А. Плехов³, А.Н. Вшивков³, Е.А. Гачегова³

¹ АО «ОДК-Авиадвигатель»

² ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

³ Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН

Influence of the laser shock peening density on the residual stresses depth and level in the titanium alloy specimens

A.A. Shiryayev¹, A.S. Milenin¹, V.V. Karmanov²,
O.A. Plehov³, A.N. Vshivkov³, E.A. Gachegova³

¹ UEC-Aviadvigatel JSC

² Perm National Research Polytechnic University

³ Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

Исследовано влияние плотности мощности лазерной ударной обработки на глубину и уровень остаточных напряжений сжатия в образцах из титанового сплава. Применяемые в авиадвигателестроении методы дробеструйного и гидродробеструйного упрочнения создают благоприятную эпюру остаточных напряжений на глубину до 0,2 мм, чего недостаточно для обеспечения требуемого уровня усталостной прочности деталей при их повреждении от попадания посторонних предметов на глубину до 1,0 мм. Рассмотрено упрочнение плоских образцов размером 50×40×2 мм методом лазерной ударной обработки. Показана возможность достижения глубины остаточных напряжений сжатия более 0,3 мм, что больше, чем при гидродробеструйной обработке. Установлено, что при относительной плотности мощности излучения более $0,5I/I_{\max}$ уровень и глубина остаточных напряжений сжатия выходят на асимптоту, равную $-0,8$ отн. ед. При увеличении числа проходов уровень остаточных напряжений сжатия возрастает на 10...15 %. Повышение коэффициента перекрытия лазерных пятен также приводит к возрастанию глубины и уровня остаточных напряжений сжатия. Форма пятна не влияет на глубину и уровень остаточных напряжений сжатия. Показано, что после интенсивной обработки поверхности образца (с числом проходов более двух) при плотности мощности излучения выше $0,5I/I_{\max}$ проявляется эффект деградации поверхности.

EDN: YTSPUW, <https://elibrary/ytspuw>

Ключевые слова: лазерная ударная обработка, глубина остаточных напряжений, уровень остаточных напряжений, плоские образцы, плотность мощности, титановый сплав

The paper examines the influence of laser shock peening power density on the residual stresses depth and level in the titanium alloy specimens. The shot blasting and hydro-shot

peening methods used in the aircraft engine manufacture are creating a favorable residual stress diagram to the depth of 0.2 mm. However, this is insufficient to ensure the required level of the elements fatigue strength when damaged by foreign objects to the depth of 1.0 mm. The paper considers hardening a flat specimen measuring 50×40×2 mm by the laser shock peening. It shows a possibility to achieve the residual compressive stress depth of more than 0.3 mm, which is better than with the hydro-shot peening. It is found that at the radiation power density of more than 0.5 I/I_{max} , the residual stresses level and depth are reaching the asymptote equal to -0.8 rel. units. With an increase in the number of passes, the residual compressive stresses level grows by 10...15%. Increasing the laser spots overlap coefficient also leads to an increase in the residual stresses depth and level. The spot shape is not affecting depth and level of the residual compressive stresses. The paper indicates that after intensive treatment of the specimen surface (with a number of passes more than two) at the radiation power density above 0.5 I/I_{max} , the surface degradation effect appears.

EDN: YTSPUW, <https://elibrary/ytspuw>

Keywords: laser shock peening, residual stresses depth, residual stresses level, flat samples, power density, titanium alloy

Эксплуатационные характеристики авиационного газотурбинного двигателя (ГТД) в значительной мере определяются усталостной прочностью его рабочих лопаток и роторных деталей. В процессе эксплуатации рабочие лопатки подвержены циклическим (мало- и многоцикловой усталости), термическим и статическим (центробежным и газодинамическим) нагрузкам, а также повреждениям от попадания посторонних предметов (льда, песка, птиц, мусора на взлетно-посадочной полосе и др.) [1].

Попадание посторонних предметов в проточную часть ГТД приводит к таким повреждениям лопаток, как забоина (рис. 1, а), отгиб и вмятина. Согласно статистическим данным, наиболее часто повреждаются входные кромки

рабочих лопаток и лопаток первых ступеней, что выражается в появлении забоин по кромкам, перу и антивибрационным полкам (при наличии) лопаток, которые нелинейно распределяются по длине тракта (ступеням) [2]. На рис. 1, б приведены статистические данные в виде распределения относительного количества повреждений ОКП (количества повреждений относительно их суммарного значения) по их видам.

Такие повреждения приводят к преждевременному съему ГТД с эксплуатации и требуют проведения ремонтов/зачисток повреждений на лопатках. Так как зачистку лопаток выполняют только на базовых аэродромах, эксплуатация ГТД становится более дорогостоящей.



Рис. 1. Результаты исследования попадания посторонних предметов в проточную часть ГТД:

а — внешний вид забоин;

б — распределение ОКП по видам повреждений (I — забоина на входной кромке; II — отгиб кромки; III и IV — отгиб и обрыв уголка; V — вмятина с разрывом; VI — трещина)

Для повышения стойкости лопаток к повреждениям на финишной операции изготовления введено их упрочнение дробеструйной и гидродробеструйной обработкой [3, 4]. Однако при таких методах упрочнения глубина распространения (далее глубина) остаточных напряжений сжатия (ОНС) не превышает 0,2 мм, чего недостаточно. Для наведения эюр ОНС на глубину до 1 мм требуются другие методы упрочнения, одним из которых является лазерная ударная обработка (ЛУО) [5, 6].

При обработке поверхности изделия методом ЛУО под действием лазерных импульсов на его поверхности генерируется плазма. С увеличением давления плазмы возникают ударные волны, распространяющиеся вглубь материала, приводящие к пластической деформации поверхностного слоя [7–9].

Достоинства ЛУО заключаются в наведении ОНС на глубину до 1 мм (что больше, чем у остальных методов упрочнения) [8–10] и в возможности обрабатывать сложнопрофильные поверхности и отверстия. Защитным покрытием служит алюминиевая фольга, лента ПВХ, черная краска и другие материалы, а удерживающим слоем — слой воды толщиной до 1 мм.

На сегодняшний день ЛУО применяют для упрочнения деталей ГТД серийно выпускаемых боевых (F-16, F-22, F-3) и гражданских (Trent 500, Trent 800, Trent 1000, BR710, CFM56) самолетов [7]. Обработке подвергают перо лопаток (рис. 2, а), контактные поверхности замковых соединений и зоны концентрации напряжений

роторных деталей (рис. 2, б). За рубежом исследованиями ЛУО занимаются компании США (LSPT, CWST), Японии (Toshiba) и Китая (Tyrida), в России — Институт механики сплошных сред УрО РАН [8], МАИ [11] и МГТУ им. Н.Э. Баумана [12].

Основными варьируемыми характеристиками при ЛУО являются энергия лазерного импульса E (Дж), форма лазерного пятна (далее пятно) и продолжительность импульса t (с). С этими характеристиками связана плотность мощности лазерного излучения (далее плотность мощности излучения)

$$I = \frac{E}{tS},$$

где S — площадь пятна, см².

За последние несколько лет проведено много исследований по определению влияния плотности мощности излучения на уровень и глубину ОНС при ЛУО.

В работах [7, 13] показано, что увеличение плотности мощности с 3 до 7 ГВт/см² приводит к увеличению ОНС до –600 МПа на глубину более 0,5 мм для титановых сплавов TC17. Аналогичные результаты при повышении плотности мощности излучения получены для титановых сплавов TC6 [14], BT6 [15] и никелевого сплава ЭП718 [16].

Варьирование размера пятна и энергии лазерного импульса при постоянной плотности мощности излучения позволяет исключить прижоги и деформации поверхностного слоя криволинейной формы.

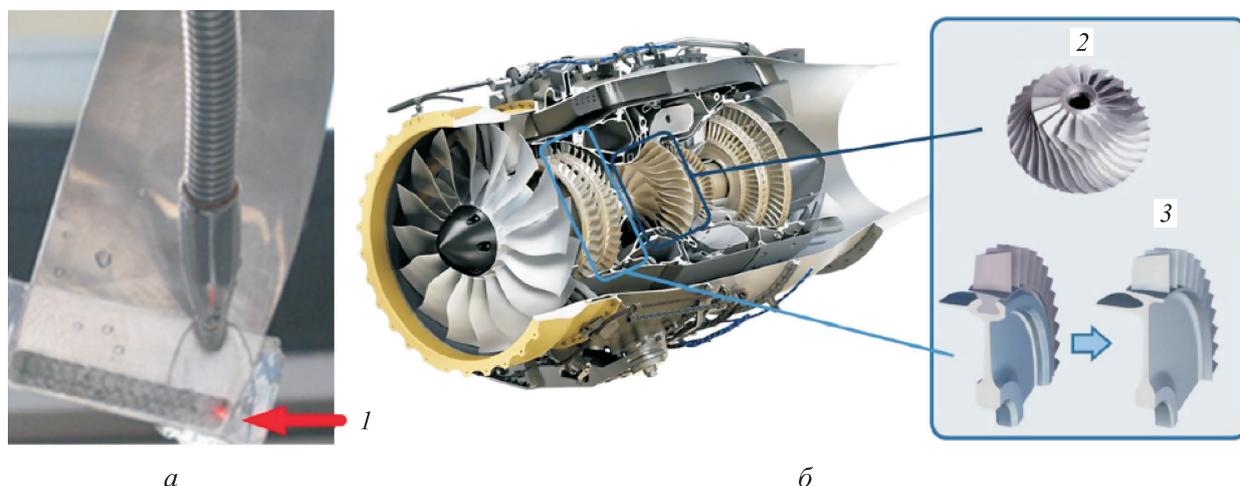


Рис. 2. ЛУО:

а — фрагмент процесса обработки пера лопатки (1 — водяной слой);
б — примеры упрочняемых роторных деталей (2 — крыльчатка; 3 — моноколесо)



Рис. 3. Схема плоского образца (а) и его внешний вид с наклеенными тензодатчиками (б)

Так, при упрочнении сложнопрофильных поверхностей роторных деталей ЛУО выполняют под углом до 60° к нормали, что сопровождается искажением пятна и потерей энергии. При ЛУО под углом удалось добиться ОНС глубиной до 1 мм [17]. Подобным образом поступают при упрочнении пера лопаток, чтобы снизить деформации. Двухстороннее упрочнение приводит к сквозному наклепу, но может вызвать откольное разрушение [18].

Изменение формы пятна приводит к изменению уровня ОНС. При квадратной форме пятна уровень ОНС выше, чем при круглой (при прочих равных условиях) [19]. Уменьшение размера пятна при постоянной плотности мощности излучения сопровождается ростом ОНС [20].

Анализ результатов перечисленных работ позволяет заключить, что ЛУО вызывает значительное увеличение глубины и уровня ОНС в образцах и деталях.

Следует отметить, что влияние плотности мощности излучения при ЛУО на глубину и уровень ОНС рассмотрено во многих работах, но данные приведены только для конкретных единичных случаев. Также отсутствует информация о законе распределения энергии по пятну [21, 22].

Цель работы — исследование влияния плотности мощности излучения на глубину и уровень ОНС при равномерном распределении энергии по пятну.

Методика проведения эксперимента. Образцы и оборудование. Для отработки режимов ЛУО использовали плоские образцы размером $50 \times 40 \times 2$ мм (рис. 3), полученные электроэрозионной вырезкой из конструктивно-подобных

элементов лопаток. Чтобы упрочнить обрабатываемую сторону образца, ее полировали до параметра шероховатости $Ra = 0,4$ мм. На противоположную сторону образца наносили нестираемую маркировку. ЛУО осуществляли Nd:YAG-лазером Beamtech SGR-Extra-10. В качестве защитного слоя применяли алюминиевую фольгу толщиной 80 мкм. Образец закрепляли со всех сторон на пластине, установленной на руке роботизированного манипулятора (рис. 4).

Уровень ОНС по глубине образца определяли в точке А (рис. 3, а) с помощью автоматизированной системы MTS3000-Restan согласно стандарту ASTM E837. На поверхность образца наклеивали тензорезистор (рис. 3, б) с тремя измерительными решетками, в определенном месте которого просверливали отверстие диаметром 1...2 мм.

К упрочнению ЛУО предъявляли следующие требования: не ухудшить предел выносливости, обеспечить благоприятную эпюру ОН на глубину до 1 мм, повысить предел выносливости лопаток с забоиной и не ухудшить геометриче-



Рис. 4. Фрагмент ЛУО плоского образца

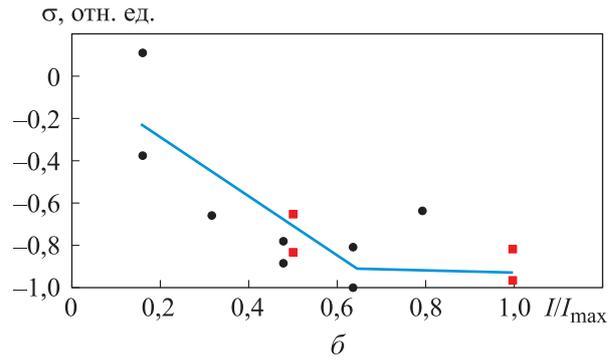
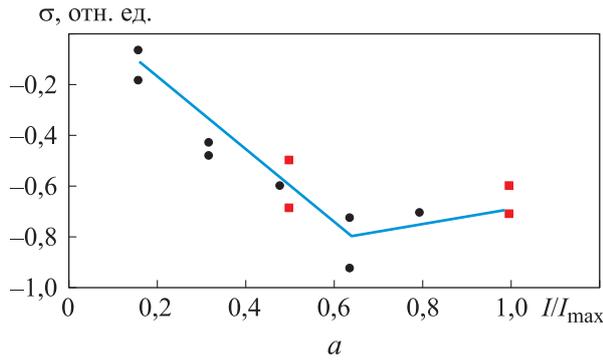


Рис. 5. Зависимости ОНС σ от относительной плотности мощности излучения I/I_{\max} после одного (а) и двух (б) проходов лазера при квадратной (■) и круглой (•) формах пятна

ские параметры и шероховатость поверхностного слоя.

Оценку режимов выполняли относительно плотности мощности излучения I как параметра, учитывающего технические особенности лазера.

Результаты и обсуждение. Графические зависимости ОНС σ от отношения плотности мощности излучения I к ее максимальному значению I_{\max} (далее относительная плотность мощности излучения) I/I_{\max} и от формы пятна после одного и двух проходов лазера приведены на рис. 5, а и б.

Видно, что при относительной плотности мощности излучения I/I_{\max} более 0,5 уровень ОНС выходит на асимптоту. После двух проходов лазера уровень ОНС возрастает на 10...15 % независимо от формы пятна.

Анализ глубины ОНС (обращение ОНС в ноль) показал, что при относительной плотности мощности излучения I/I_{\max} более 0,5 после одного прохода лазера асимптоты по глубине воздействия не наблюдается, она линейно растет. Второй проход лазера позволил увеличить глубину прорабатываемого слоя на 30 %.

После двух проходов лазера уровень и глубина ОНС оказались больше, чем после одного. Коэффициент перекрытия пятен η также влияет на уровень и глубину ОНС, что показано на рис. 6, где данные внутри области в форме эллипса соответствуют квадратному пятну. Однако при перекрытии пятен $\eta = 50\%$ и более происходит воздействие на уже обработанный материал, что может быть аналогично случаю с несколькими проходами и меньшим коэффициентом перекрытия пятен. При относительной плотности мощности излучения I/I_{\max} более 0,75 и коэффициенте перекрытия пятен $\eta = 50\%$ происходит повреждение защитного слоя.

Согласно рис. 6, явного влияния формы пятна на глубину и уровень ОНС не наблюдается. При квадратной форме пятна коэффициент перекрытия пятен оказывает меньшее воздействие на глубину ОНС, чем при круглой.

Увеличение коэффициента перекрытия пятен приводит к возрастанию глубины и уровня ОНС.

Однако теоретический анализ позволяет утверждать, что на уровень ОНС влияет амплитуда давления и, как следствие, плотность мощности излучения. Глубина ОНС определяется продолжительностью импульса. Смена асимптотики зависимости уровня ОНС от плотности энергии в точке $I/I_{\max} = 0,5$ подтверждает эффект образования второго плазменного факела на границе ламинарный поток воды — воздух, ограничивающего передачу энергии лазерного излучения к поверхности материала.

Такой вывод сделан и в работах [5, 21]: плазма вторичного факела начинает поглощать значительную часть энергии лазера, приводя к тому, что повышение его мощности не вызывает дальнейшего роста пикового давления первичной плазмы или даже приводит к его сни-

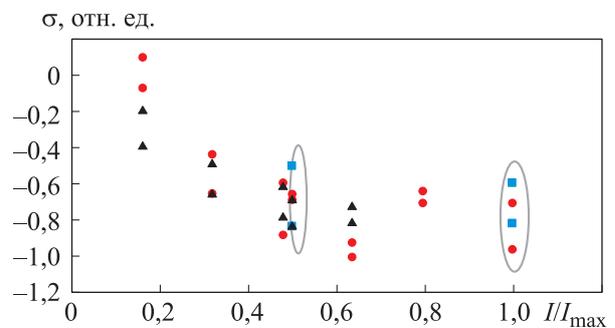


Рис. 6. Зависимости ОНС σ от относительной плотности мощности излучения I/I_{\max} при коэффициенте перекрытия пятен $\eta = 0$ (■), 30 (•) и 50 % (▲)

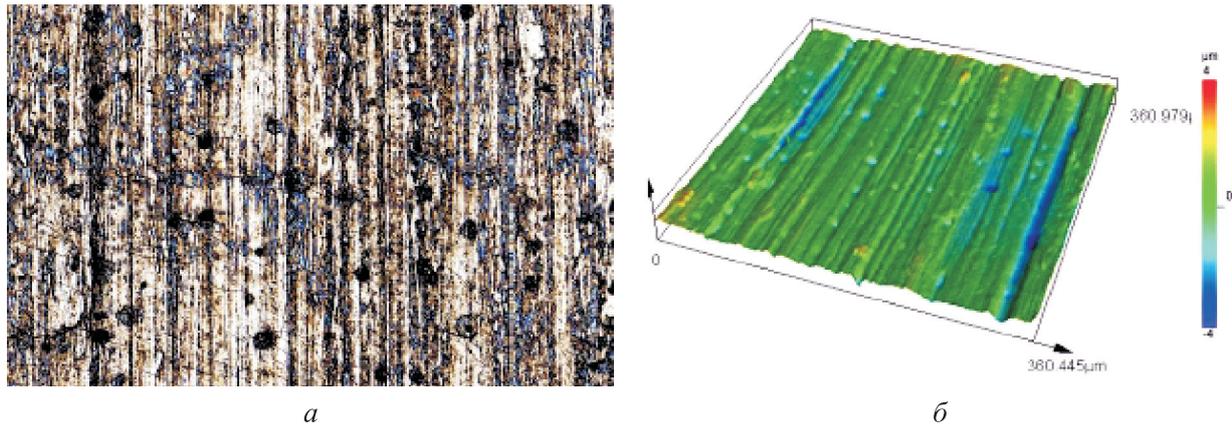


Рис. 7. Дефекты поверхности образца, возникающие при интенсивной ЛУО с относительной плотностью мощности излучения $I/I_{\max} > 0,5$ после трех проходов лазера:
 а — микроструктура поверхности; б — 3D-профиль поверхности

жению. Это явление называют оптическим пробоем. Пробой может быть вызван и первичным лучом лазера при достижении им некоторой пороговой мощности (как правило, при $I/I_{\max} = 0,4 \dots 0,5$).

Также установлено, что при интенсивной обработке поверхности образцов с повышенной плотностью мощности излучения ($I/I_{\max} > 0,5$) после двух проходов и более наблюдается деградация поверхности в виде появления характерных дефектов (рис. 7).

Такие повреждения появляются в результате образования пустот между приклеиваемым абляционным покрытием и поверхностью металла. При прохождении ударной волны через такие несплошности происходит их сжатие, что приводит к резкому возрастанию температуры газа и его воздействию на металлическую поверхность. Такой нагрев вызывает окисление и образование термических дефектов.

Косвенным подтверждением предположения является рис. 7, б, где показано совпадение образовавшихся дефектов с рельефом поверхности образца: термические дефекты появились в самых глубоких бороздках.

Выводы

1. При относительной плотности мощности излучения более 0,5 уровень ОНС выходит на асимптоту $-0,8$ отн. ед. С увеличением числа проходов лазера уровень ОНС возрастает на 10...15 %.

2. При относительной плотности мощности излучения более 0,5 существует асимптота по глубине ОНС свыше 0,3 мм. Второй проход лазера обеспечил увеличение глубины прорабатываемого слоя на 30 %.

3. После двух проходов лазера уровень и глубина ОНС больше, чем после одного. Повышение коэффициента перекрытия пятен также дает возможность увеличить уровень и глубину ОНС, но не так существенно, как число проходов.

4. При относительной плотности мощности излучения выше 0,5 после двух проходов лазера и более наблюдается деградация поверхности в виде появления характерных дефектов.

5. Форма пятна не влияет на уровень и глубину ОНС.

Литература

- [1] Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. *Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок*. Москва, Машиностроение, 2008, т. 2. 368 с.
- [2] Нгуен Т.Ш. *Методика оценки влияния эксплуатационных повреждающих воздействий на качество функционирования компрессора ГТД*. Автореф. дисс. ... канд. тех. наук. Москва, МАИ, 2022. 24 с.
- [3] Волков Д.И., Гуцин А.Ю., Рыкунов А.Н. Технологические возможности обработки металлическими и стеклянными микрошариками материалов ВТ9 и ЭИ787ВД. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2017, т. 13, № 8, с. 365–369.

- [4] Непеин К.Г., Селиванов И.А. Повышение характеристик сопротивления усталости рабочих лопаток компрессора, изготовленных из титанового сплава. *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*, 2019, № 57, с. 129–136, doi: <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2019.57.10>
- [5] Ширяев А.А., Габов И.Г., Миленин А.С. Влияние лазерного ударного упрочнения на параметры поверхностного слоя лопаток компрессора газотурбинного двигателя из титанового сплава. *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*, 2024, № 1, с. 66–73.
- [6] Ширяев А.А., Габов И.Г., 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.
- [7] Новиков И.А., Ножницкий Ю.А., Шибяев С.А. Мировой опыт в исследовании и применении технологического процесса лазерной ударной обработки металлов (обзор). *Авиационные двигатели*, 2022, № 2, с. 59–82, doi: https://doi.org/10.54349/26586061_2022_1_59
- [8] Гачетова Е.А., Сихамов Р., Фенцке Ф. и др. Влияние лазерной ударной проковки на мало- и многоцикловую усталость титанового сплава ОТ4-0. *Прикладная механика и техническая физика*, 2022, т. 63, № 2, с. 182–191, doi: <https://doi.org/10.15372/PMTF20220217>
- [9] Sundar R., Ganesh P., Gupta R.K. et al. Laser shock peening and its applications: a review. *Lasers Manuf. Mater. Process.*, 2019, vol. 6, no. 7, pp. 424–463, doi: <https://doi.org/10.1007/s40516-019-00098-8>
- [10] Ширяев А.А., Габов И.Г., Миленин А.С. и др. Сравнение методов упрочнения на предел выносливости лопаток из титанового сплава. *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*, 2023, № 4, с. 109–117.
- [11] Ляховецкий М.А., Королев Д.Д., Кожевников Г.Д. и др. Лазерное ударное упрочнение титанового сплава ВТ6 с алюминиевым абляционным покрытием. В: *Быстрозакаленные материалы и покрытия*. Москва, Пробел-2000, 2021, с. 258–263.
- [12] Зо Й.М. *Ударная обработка цветных металлов и сплавов маломощными лазерными источниками*. Автореф. дисс. ... канд. тех. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. 18 с.
- [13] Wang M., Konovalov S., Dai F. et al. Influence of process parameters on laser shock processing effect of aero-engine blades. *J. Surf. Investig.*, 2022, vol. 16, no. 6, pp. 1208–1220, doi: <https://doi.org/10.1134/S102745102206043X>
- [14] Nie X., He W., Li Q. et al. Experiment investigation on microstructure and mechanical properties of TC17 titanium alloy treated by laser shock peening with different laser fluence. *J. Laser Appl.*, 2013, vol. 25, no. 4, art. 042001, doi: <https://doi.org/10.2351/1.4800444>
- [15] *Моделирование лазерной ударной проковки*. URL: https://www.icmm.ru/images/pages/news/newsfiles/supersonic/seminar_01_11_2022/Kostina_et.al._LSP_2022.pdf (дата обращения: 15.06.2024).
- [16] Кожевников Г.Д. *Разработка комплексной математической модели лазерного удара для решения инженерных задач. Оптимизация режимов обработки лазерным ударным упрочнением жаропрочного сплава Inconel 718 численным моделированием*. URL: https://www.icmm.ru/images/pages/news/newsfiles/supersonic/seminar_01_11_2022/Kozhevnikov.pdf (дата обращения: 15.06.2024).
- [17] Ye Y., Zhang Y., Huang T. et al. A critical review of laser shock peening of aircraft engine components. *Adv. Eng. Mater.*, 2023, vol. 25, no. 16, art. 2201451, doi: <https://doi.org/10.1002/adem.202201451>
- [18] Ledon D., Balakhnin A., Uvarov S. et al. Behavior of Zr–1Nb alloy in coarse- and ultrafine-grain states under laser-induced shock wave loading. *Frat. ed Integrita Strutt.*, 2023, vol. 17, no. 66, pp. 164–177, doi: <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.66.10>
- [19] Zou Sh., Wu J., Zhang Y. et al. Surface integrity and fatigue lives of Ti17 compressor blades subjected to laser shock peening with square spots. *Surf. Coat. Technol.*, 2018, vol. 347, pp. 398–406, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.05.023>

- [20] Sun B., Zhao J., Qiao H. et al. Effects of square spot size and beam quality on residual stress of 7050 aluminum alloy by laser shock peening. *Mater. Chem. Phys.*, 2022, vol. 284, art. 126023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126023>
- [21] Rondepierre A., Sollier A., Videau L. et al. Review on laser interaction in confined regime: discussion about the plasma source term for laser shock applications and simulations. *Metals*, 2021, vol. 11, no. 12, art. 2032, doi: <https://doi.org/10.3390/met11122032>
- [22] Bovid S., Kattoura M., Clauer A. et al. Pressure amplification and modelization in laser shock peening of Ti-6Al-4V and AA7085 with adhesive-backed opaque overlays. *J. Mater. Process Technol.*, 2022, vol. 299, art. 117381, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117381>

References

- [1] Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A., Sandratskiy V.L. *Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok*. T. 2 [Fundamentals of design of aircraft engines and power plants. Vol. 2]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 368 p. (In Russ.).
- [2] Nguen T.Sh. *Metodika otsenki vliyaniya ekspluatatsionnykh povrezhdayushchikh vozdeystviy na kachestvo funktsionirovaniya kompressora GTD*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Methodology of estimation of influence of operational damaging influences on quality of functioning of GTE compressor. Abs. kand. tech. sci. diss.]. Moscow, MAI Publ., 2022. 24 p. (In Russ.).
- [3] Volkov D.I., Gushchin A.Yu., Rykunov A.N. Technological possibilities of processing by metal and glass microspheres of materials VT9 and EI787VD. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening Technologies and Coatings], 2017, vol. 13, no. 8, pp. 365–369. (In Russ.).
- [4] Nepein K.G., Selivanov I.A. Improving the fatigue resistance characteristics of compressor blades made of titanium alloy. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika* [PNRPU Aerospace Engineering Bulletin], 2019, no. 57, pp. 129–136, doi: <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2019.57.10> (in Russ.).
- [5] Shiryaev A.A., Gabov I.G., Milenin A.S. Influence of laser impact hardening on the parameters of the surface layer of turbine engine compressor blades made of titanium alloy. *Vestnik PNIPU. Mashinostroenie, materialovedenie* [Bulletin PNRPU. Mechanical Engineering, Materials Science], 2024, no. 1, pp. 66–73. (In Russ.).
- [6] Shiryaev A.A., Gabov I.G., Popova Yu.V. LSPwC influence on the surface layer parameters of the titanium alloy GTE compressor blades. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2024, no. 3, pp. 32–41. EDN: JEEASU (In Russ.).
- [7] Novikov I.A., Nozhnitskiy Yu.A., Shibaev S.A. International experience in research and application of the technological process of laser shockpeening of metals (review). *Aviatsionnye dvigateli* [Aviation Engines], 2022, no. 2, pp. 59–82, doi: https://doi.org/10.54349/26586061_2022_1_59 (in Russ.).
- [8] Gachetova E.A., Sikhamov R., Fentske F. et al. Influence of laser shock peening on low- and high-cycle fatigue of an ot4-0 titanium alloy. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2022, vol. 63, no. 2, pp. 182–191, doi: <https://doi.org/10.15372/PMTF20220217> (in Russ.). (Eng. version: *J. Appl. Mech. Tech. Phy.*, 2022, vol. 63, no. 2, pp. 335–342, doi: <https://doi.org/10.1134/S0021894422020171>)
- [9] Sundar R., Ganesh P., Gupta R.K. et al. Laser shock peening and its applications: a review. *Lasers Manuf. Mater. Process.*, 2019, vol. 6, no. 7, pp. 424–463, doi: <https://doi.org/10.1007/s40516-019-00098-8>
- [10] Shiryaev A.A., Gabov I.G., Milenin A.S. et al. Comparison of hardening methods on blades of titanium alloy. *Vestnik PNIPU. Mashinostroenie, materialovedenie* [Bulletin PNRPU. Mechanical Engineering, Materials Science], 2023, no. 4, pp. 109–117. (In Russ.).
- [11] Lyakhovetskiy M.A., Korolev D.D., Kozhevnikov G.D. et al. Lazernoe udarnoe uprochnenie titanovogo splava VT6 s alyuminiyevym ablyatsionnym pokrytiem [Laser impact hardening of titanium alloy BT6 with aluminium ablative coating]. V: *Bystrozakalennyye materialy i*

- pokrytiya* [In: Rapidly hardened materials and coatings]. Moscow, Probel-2000 Publ., 2021, pp. 258–263. (In Russ.).
- [12] Zo Y.M. *Udarnaya obrabotka tsvetnykh metallov i splavov malomoshchnymi lazernymi istochnikami*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Impact machining of non-ferrous metals and alloys by low-power laser sources. Abs. kand. tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2020. 18 p. (In Russ.).
- [13] Wang M., Konovalov S., Dai F. et al. Influence of process parameters on laser shock processing effect of aero-engine blades. *J. Surf. Investig.*, 2022, vol. 16, no. 6, pp. 1208–1220, doi: <https://doi.org/10.1134/S102745102206043X>
- [14] Nie X., He W., Li Q. et al. Experiment investigation on microstructure and mechanical properties of TC17 titanium alloy treated by laser shock peening with different laser fluence. *J. Laser Appl.*, 2013, vol. 25, no. 4, art. 042001, doi: <https://doi.org/10.2351/1.4800444>
- [15] *Modelirovanie lazernoy udarnoy prokovki* [Modelling of laser impact forging]. URL: https://www.icmm.ru/images/pages/news/newsfiles/supersonic/seminar_01_11_2022/Kostina_et.al._LSP_2022.pdf (accessed: 15.06.2024). (In Russ.).
- [16] Kozhevnikov G.D. *Razrabotka kompleksnoy matematicheskoy modeli lazernogo udara dlya resheniya inzhenernykh zadach. Optimizatsiya rezhimov obrabotki lazernym udarnym uprochneniem zharoprochnogo splava Inconel 718 chislennym modelirovaniem* [Development of a complex mathematical model of laser shock for solving engineering problems. Optimisation of processing modes by laser shock hardening of Inconel 718 heat-resistant alloy by numerical simulation]. URL: https://www.icmm.ru/images/pages/news/newsfiles/supersonic/seminar_01_11_2022/Kozhevnikov.pdf (accessed: 15.06.2024). (In Russ.).
- [17] Ye Y., Zhang Y., Huang T. et al. A critical review of laser shock peening of aircraft engine components. *Adv. Eng. Mater.*, 2023, vol. 25, no. 16, art. 2201451, doi: <https://doi.org/10.1002/adem.202201451>
- [18] Ledon D., Balakhnin A., Uvarov S. et al. Behavior of Zr–1Nb alloy in coarse- and ultrafine-grain states under laser-induced shock wave loading. *Frat. ed Integrita Strutt.*, 2023, vol. 17, no. 66, pp. 164–177, doi: <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.66.10>
- [19] Zou Sh., Wu J., Zhang Y. et al. Surface integrity and fatigue lives of Ti17 compressor blades subjected to laser shock peening with square spots. *Surf. Coat. Technol.*, 2018, vol. 347, pp. 398–406, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.05.023>
- [20] Sun V., Zhao J., Qiao H. et al. Effects of square spot size and beam quality on residual stress of 7050 aluminum alloy by laser shock peening. *Mater. Chem. Phys.*, 2022, vol. 284, art. 126023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126023>
- [21] Rondepierre A., Sollier A., Videau L. et al. Review on laser interaction in confined regime: discussion about the plasma source term for laser shock applications and simulations. *Metals*, 2021, vol. 11, no. 12, art. 2032, doi: <https://doi.org/10.3390/met11122032>
- [22] Bovid S., Kattoura M., Clauer A. et al. Pressure amplification and modelization in laser shock peening of Ti-6Al-4V and AA7085 with adhesive-backed opaque overlays. *J. Mater. Process Technol.*, 2022, vol. 299, art. 117381, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117381>

Статья поступила в редакцию 10.09.2024

Информация об авторах

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

Information about the authors

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

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

КАРМАНОВ Вадим Владимирович — зав. кафедрой «Инновационные технологии машиностроения». ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (614990, Пермь, Российская Федерация, Комсомольский пр-т, д. 29, e-mail: karmanovs@yandex.ru).

ПЛЕХОВ Олег Анатольевич — член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, директор. Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН (614990, Пермь, Российская Федерация, ул. Ленина, 13А, e-mail: psc@permisc.ru).

ВШИВКОВ Алексей Николаевич — младший научный сотрудник лаборатории термомеханики твердых тел. Институт механики сплошных сред УрО РАН — филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (614013, Пермь, Российская Федерация, ул. Академика Королева, д. 1, e-mail: vshivkov.a@icmm.ru).

ГАЧЕГОВА Елена Алексеевна — инженер лаборатории термомеханики твердых тел. Институт механики сплошных сред УрО РАН — филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (614013, Пермь, Российская Федерация, ул. Академика Королева, д. 1, e-mail: gachegova.e@icmm.ru).

KARMANOV Vadim Vladimirovich — Head of the Department of Innovative Mechanical Engineering Technologies. Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Russian Federation, Komsomolskiy Ave., Bldg. 29, e-mail: karmanovs@yandex.ru).

PLEHOV Oleg Anatolievich — Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Science (Phys.-Math.), Director. Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (614990, Perm, Russian Federation, Lenina St., Bldg. 13A, e-mail: psc@permisc.ru).

VSIVKOV Alexey Nikolaevich — Junior Researcher. Solid Thermomechanics Laboratory. Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science (614013, Perm, Russian Federation, Akademika Koroleva St., Bldg. 1, e-mail: vshivkov.a@icmm.ru).

GACHEGOVA Elena Alekseevna — Engineer, Laboratory of Solid Thermomechanics. Institute of Continuous Media Mechanics, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Science (614013, Perm, Russian Federation, Akademika Koroleva St., Bldg. 1, e-mail: gachegova.e@icmm.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ширяев А.А., Миленин А.С., Карманов В.В., Плехов О.А., Вшивков А.Н., Гачегова Е.А. Влияние плотности мощности лазерной ударной обработки на глубину и уровень остаточных напряжений в образцах из титанового сплава. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 9, с. 31–40.

Please cite this article in English as:

Shiryayev A.A., Milenin A.S., Karmanov V.V., Plehov O.A., Vshivkov A.N., Gachegova E.A. Influence of the laser shock peening density on the residual stresses depth and level in the titanium alloy specimens. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 9, pp. 31–40.