

УДК 621.787, 620.179, 621.789

## Влияние плотности мощности излучения лазера, количества проходов и коэффициента перекрытия зон упрочнения на уровень остаточных напряжений, глубину залегания и шероховатость в образцах из титанового сплава

А.А. Ширяев<sup>1,2</sup>, А.С. Миленин<sup>1</sup>, В.В. Карманов<sup>2</sup>,  
О.А. Плехов<sup>3</sup>, А.Н. Вшивков<sup>3</sup>, Е.А. Гачегова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> АО «ОДК-Авиадвигатель»

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

<sup>3</sup> Институт механики сплошных сред Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения РАН

## Influence of laser power density, number of passes and coefficient overlap of hardening zones on the level of residual stresses, depth and roughness in titanium alloy samples

A.A. Shiryaev<sup>1,2</sup>, A.S. Milenin<sup>1</sup>, V.V. Karmanov<sup>2</sup>,  
O.A. Plehov<sup>3</sup>, A.N. Vshivkov<sup>3</sup>, E.A. Gachegova<sup>3</sup>

<sup>1</sup> JSC UEC-Aviadvigatel

<sup>2</sup> Perm National Research Polytechnic University

<sup>3</sup> Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science

Исследовано влияние режимов лазерной ударной обработки на параметры поверхностного слоя образцов из титанового сплава. Используемые в авиадвигателестроении методы дробеструйной и гидродробеструйной обработок создают благоприятную эпюру остаточных напряжений на глубину до 0,2 мм, однако этого недостаточно для обеспечения требуемого уровня усталостной прочности деталей при их повреждении от попадания посторонних предметов на глубину до 1 мм. В целях повышения стойкости образцов рассмотрено упрочнение методом лазерной ударной обработки. Объектом исследования являлся плоский образец размером 50×40×2 мм из титанового сплава. Лазерная ударная обработка образцов выполнена твердотельным лазером Nd:YAG. В качестве защитного слоя использована алюминиевая фольга толщиной 80 мкм. Показана принципиальная возможность достижения глубины остаточных напряжений сжатия более 1,5 мм, что больше, чем при других методах обработки. Установлено, что при плотности мощности излучения лазера  $(0,40...0,86)I/I_{max}$  уровень остаточных напряжений сжатия выходит на асимптоту и значительно не изменяется. При увеличении числа проходов остаточные напряжения сжатия возрастают на 10...15 %. Отмечено, что после двух проходов лазера уровень остаточных напряжений и глубина их распространения больше, чем после одного прохода. Коэффициент перекрытия лазерных пятен также позволяет увеличить уровень и глубину остаточных напряжений сжатия, но оказывает на них меньшее влияние, чем другие параметры. В диапазоне плотности мощности излучения лазера  $(0,3...0,6)I/I_{max}$  параметр шероховатости поверхности выходит на асимптоту  $Ra = 0,4$  мм. Установлено, что для

деформации образца определяющими параметрами являются плотность мощности излучения и число проходов лазера. При плотности мощности излучения лазера до  $0,4I/I_{\max}$  деформация резко возрастает до 0,2 мм и остается неизменной до  $0,8I/I_{\max}$ .

EDN: KMLEZS, <https://elibrary/kmlezs>

**Ключевые слова:** лазерная ударная обработка, глубина остаточных напряжений, остаточные напряжения, плоские образцы, плотность мощности излучения, титановый сплав

The paper presents results of studying the effect of laser shock peening on the surface layer parameters in the titanium alloy specimens. Shot blasting and hydro-shot peening methods are used in the aircraft engine manufacture and create a favorable residual stress diagram to the depth of 0.2 mm. However, this is not enough to ensure the required level of fatigue strength in parts damaged by foreign objects to the depth of 1 mm. In order to increase the specimens' durability, the paper considers the laser shock peening method. The study object was a specimen with the 50×40×2 mm dimensions made of the titanium alloy. A solid-state Nd:YAG laser was used in laser shock peening of the specimens. A protective layer was formed by aluminum foil with the thickness of 80 μm. The paper shows a fundamental possibility of achieving a depth of the residual compressive stresses of more than 1.5 mm during the laser shock peening, which is higher than with the other machining methods. It is found that at the radiation power density of  $0.40...0.86I/I_{\max}$ , the residual stresses level reaches an asymptote and is not changing significantly. With an increase in the number of passes, the residual compression stresses increase by 10...15 %. The paper notes that after two laser passes, the residual stresses level and the depth of action are higher than after a single pass. The overlapping degree also makes it possible to increase the level and depth of residual stresses, but has a lower effect. The roughness parameter reaches an asymptote  $R_a = 0.4$  mm in the range of radiation power density of  $0.3...0.6I/I_{\max}$ . The paper shows that power density and the number of laser passes are decisive in deformation of the sample. At the radiation power density of up to  $0.4I/I_{\max}$ , deformation sharply increases up to 0.2 mm and then remains unchanged up to  $0.8I/I_{\max}$ .

EDN: KMLEZS, <https://elibrary/kmlezs>

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

Элементами авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), в значительной мере определяющими их эксплуатационные характеристики, являются рабочие лопатки и роторные детали. Рабочие лопатки подвержены циклическим (мало- и многоциклового усталости), термическим и статическим (центробежным и газодинамическим) нагрузкам, а также повреждению от попадания посторонних предметов (льда, песка, птиц, мусора на взлетно-посадочной полосе и др.) [1].

Попадание посторонних предметов в прочную часть ГТД приводит к таким повреждениям рабочих лопаток, как забоина (рис. 1, а), отгиб и вмятина. Согласно статистическим данным (рис. 1, б), 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 распределены по длине тракта (ступе-

ням) [2]. На рис. 1, б показано распределение 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 ремонта/зачистки повреждений на лопатках. Так как зачистку лопаток выполняют только на базовых аэродромах, эксплуатация ГТД становится более дорогостоящей.

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

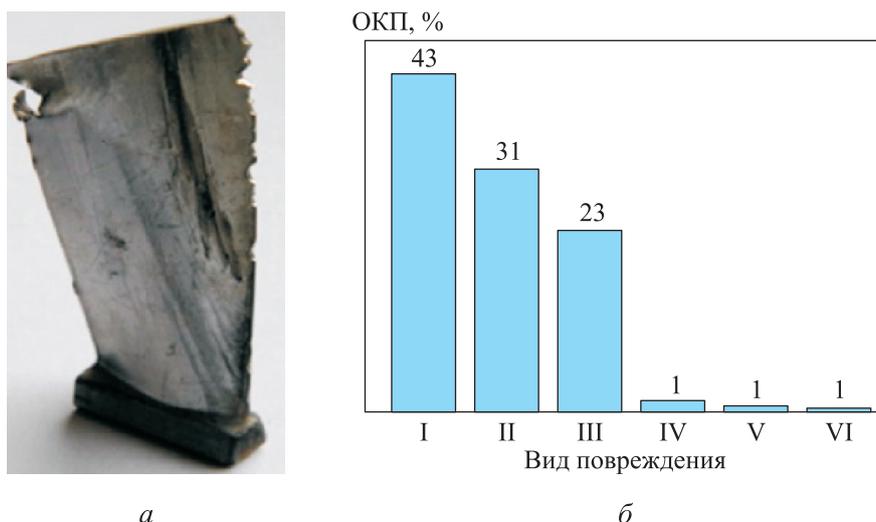


Рис. 1. Результаты исследования попадания посторонних предметов в проточную часть ГТД:  
 а — внешний вид забоин;  
 б — распределение ОКП по видам повреждений (I — забоина на входной кромке; II — отгиб кромки;  
 III и IV — отгиб и обрыв уголка; V — вмятина с разрывом; VI — трещина)

ЛУО — метод обработки поверхности детали, где под действием лазерных импульсов генерируется плазма, при увеличении давления которой возникают ударные волны, распространяющиеся вглубь материала, приводящие к пластической деформации поверхностного слоя [7–9]. Преимущество ЛУО перед другими методами упрочнения [8–10] заключается в возможности наведения ОНС на глубину до 1 мм и в способности обработки сложнопрофильных поверхностей и отверстий. В качестве защитного покрытия выступают алюминиевая фольга, лента ПВХ, черная краска и другие материалы, а удерживающим слоем, как правило, служит слой воды толщиной до 1 мм.

На сегодняшний день ЛУО применяют в серийно выпускаемых самолетах F-16, F-22 и F-35, а также в гражданских ГТД: Trent 500, Trent 800, Trent 1000, BR710 и CFM56 [7]. Обработке подвергают перо лопаток [11] (рис. 2, а), контактные поверхности замковых соединений роторных деталей, зоны концентрации напряжений роторных деталей (рис. 2, б).

За рубежом исследованием ЛУО занимаются такие компании, как LSPT, CWST (США), Toshiba (Япония) и Tyrida (Китай), в России — ИМСС УрО РАН [8], МАИ [12], МГТУ им. Баумана [13], ЦИАМ [7] и АО «ОДК-Авиадвигатель» [5, 6, 10].

Основными варьируемыми характеристиками ЛУО являются форма лазерного пятна (далее пятно), энергия  $E$  (Дж) и продолжительность  $t$  (с) лазерного импульса, с которыми

связана плотность мощности лазерного излучения (далее плотность мощности излучения) следующим образом:

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

где  $S$  — площадь пятна, см<sup>2</sup>.

За последние несколько лет проведено большое количество исследований влияния плотности мощности излучения ЛУО на уровень и глубину ОНС.

В работах [7, 14] показано, что при ЛУО титановых сплавов TC17 увеличение плотности мощности излучения с 3 до 7 ГВт/см<sup>2</sup> приводит к повышению ОНС до –600 МПа на глубину более 0,5 мм. Аналогичный результат при увеличении плотности мощности излучения получен для титановых сплавов TC6 [15], BT6 [11] и никелевого сплава ЭП718 [16].

Варьирование размера пятна и энергии лазерного импульса при постоянной плотности мощности позволяет исключить прижоги и деформации поверхностного слоя при упрочнении криволинейных поверхностей.

При упрочнении сложнопрофильных поверхностей роторных деталей ЛУО выполняют под углом до 60° от нормали, в связи с чем происходит искажение светового пятна и, как следствие, потеря энергии. При ЛУО под углом удастся добиться ОНС глубиной до 1 мм [17]. Подобным образом поступают при упрочнении пера лопаток, чтобы снизить деформации при обработке. Двухстороннее упрочнение приво-

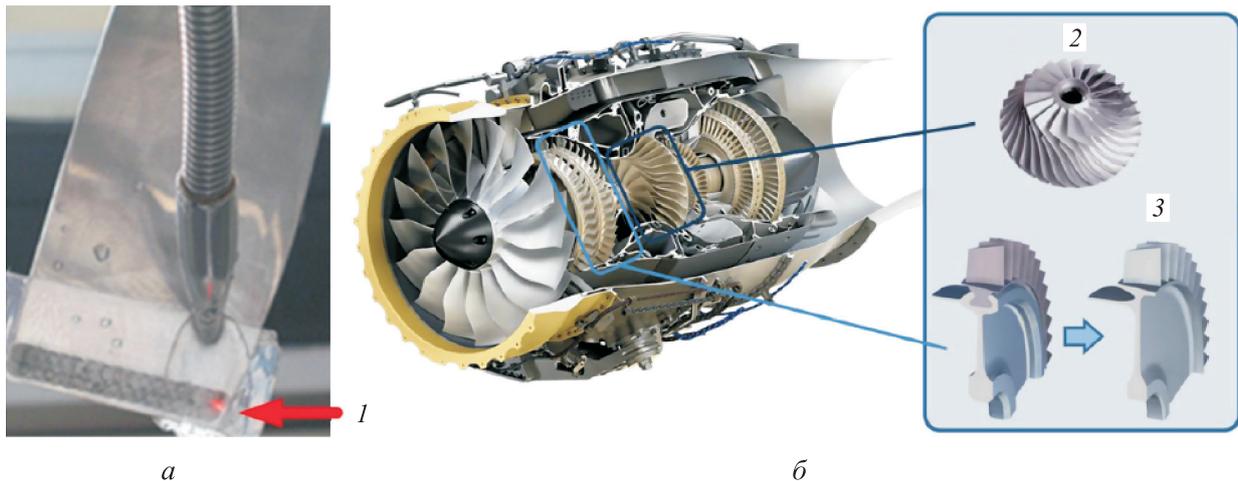


Рис. 2. ЛУО:

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

дит к сквозному наклепу, но может вызвать от-  
 кольное разрушение [18].

Изменение формы пятна вызывает измене-  
 ние уровня ОНС. При квадратной форме пятна  
 ОНС больше, 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 сделать вывод, что ЛУО приводит к  
 значительному увеличению глубины и уровня  
 ОНС в образцах и деталях.

Следует отметить, что влияние плотности  
 мощности излучения ЛУО на глубину и уро-  
 вень остаточных напряжений рассмотрено во  
 многих работах, но данные приведены только  
 для конкретных единичных случаев. Также от-  
 ссутствует информация о законе распределения  
 энергии по пятну [21–23].

Цель работы — исследование влияния ре-  
 жимов ЛУО на параметры поверхностного  
 слоя: глубину и уровень ОНС, шероховатость и  
 деформацию в зависимости от плотности мощ-  
 ности излучения, числа проходов лазера и ко-  
 эффициента перекрытия пятен при равномер-  
 ном распределении энергии по пятну лазерного  
 импульса.

**Методика проведения эксперимента. Образцы  
 и оборудование.** Отработку режимов ЛУО про-  
 водили на плоских образцах размером 50×40×2  
 мм из титанового сплава (рис. 3, *a*), полученных  
 электроэрозионной вырезкой из конструктивно  
 подобных элементов лопаток. Затем для упроч-  
 нения образцы полировали до параметра шеро-  
 ховатости поверхности  $Ra = 0,4$  мкм.

ЛУО выполняли твердотельным лазером  
 Nd:YAG. В качестве защитного слоя использо-

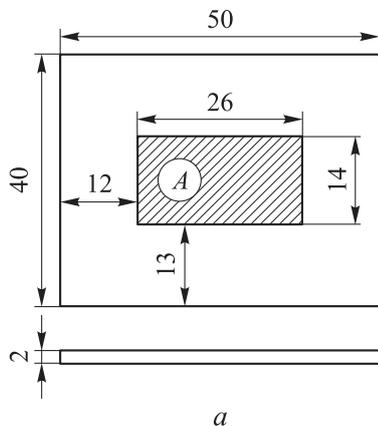


Рис. 3. Схема плоского образца (*a*) и его внешний вид с наклеенным тензодатчиком (*б*)  
 для определения уровня ОНС

вали алюминиевую фольгу толщиной 80 мкм. Образец закрепляли со всех сторон на пластине, установленной на руке роботизированного манипулятора.

Уровень ОНС по глубине образца определяли в точке А с помощью автоматизированной системы измерения ОНС MTS3000-Restan в соответствии со стандартом 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:

- обеспечение благоприятной эпюры ОНС на глубину до 1 мм;
- неухудшение исходных геометрических параметров и поверхностного слоя (параметра шероховатости).

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

**Результаты и обсуждение.** Результаты упрочнения титановых образцов путем ЛУО приведены в виде графических зависимостей уровня и глубины ОНС, параметра шероховатости поверхности и деформации от плотности мощности излучения  $I/I_{\max}$  ( $I_{\max}$  — максимальное значение плотности мощности излучения) и коэффициента перекрытия пятен после одного и двух проходов лазера. Нижний маркер соответствует одному проходу лазера, верхний — двум.

Зависимость глубины ОНС  $h$  в титановом образце от плотности мощности излучения

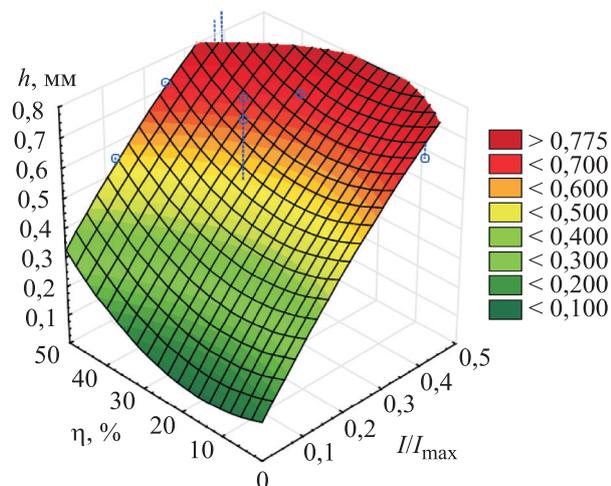


Рис. 4. Зависимость глубины ОНС  $h$  в титановом образце от плотности мощности излучения  $I/I_{\max}$  и коэффициента перекрытия пятен  $\eta$

$I/I_{\max}$  и коэффициента перекрытия пятен  $\eta$  приведена на рис. 4. Изменение глубины ОНС имеет нелинейный характер. Влияние числа проходов на глубину ОНС сказывается в большей степени при повышении плотности мощности излучения. После двух проходов лазера глубина ОНС возрастает до 30 %.

Зависимость ОНС  $\sigma$  в титановом образце от плотности мощности излучения  $I/I_{\max}$  и коэффициента перекрытия пятен  $\eta$  приведена на рис. 5. Видно, что изменение уровня ОНС имеет нелинейный характер. При плотности мощности излучения  $(0,50...0,86)I/I_{\max}$  уровень ОНС выходит на асимптоту. При увеличении числа проходов уровень ОНС возрастает на 10...15 %. Повышение плотности мощности излучения и коэффициента перекрытия пятен позволяет добиться высокого уровня ОНС, но это может привести к уменьшению усталостной прочности.

Максимальные уровень и глубину ОНС можно получить повышением плотности мощности излучения и коэффициента перекрытия пятен. Однако это потребует увеличения толщины защитного слоя, чтобы не допустить его повреждения (пробоя), так как пробой приведет к скачкообразному росту шероховатости и растрескиванию поверхностного слоя.

Использование алюминиевой фольги/ленты ПВХ при ЛУО деталей ГТД является оптимальным только в опытных работах. При внедрении ЛУО для серийных деталей наклеивание защитного слоя становится проблематичным, поэтому целесообразно заниматься разработ-

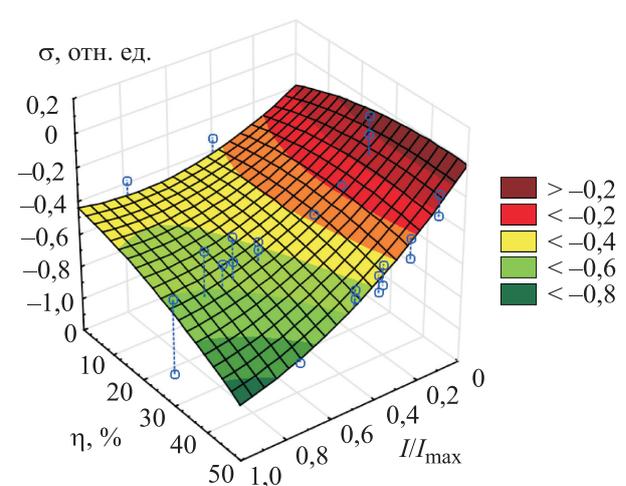


Рис. 5. Зависимость ОНС  $\sigma$  в титановом образце от плотности мощности излучения  $I/I_{\max}$  и коэффициента перекрытия пятен  $\eta$

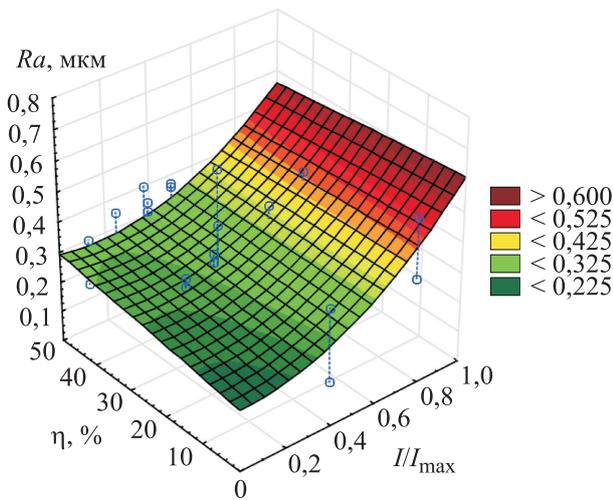


Рис. 6. Зависимость параметра шероховатости поверхности  $Ra$  титанового образца от плотности мощности излучения  $I/I_{\max}$  и коэффициента перекрытия пятен  $\eta$

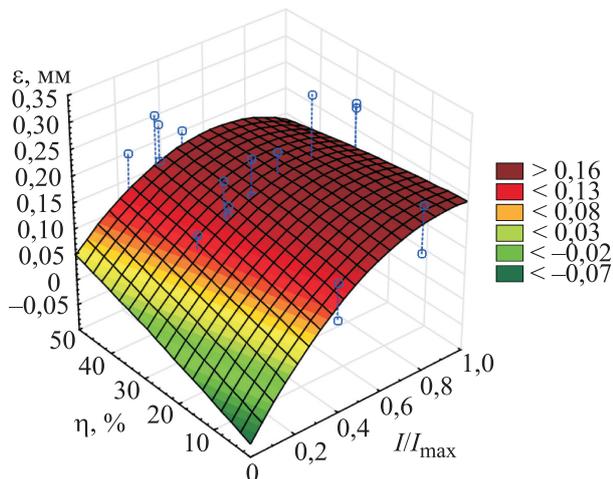


Рис. 7. Зависимость деформации  $\epsilon$  титанового образца от плотности мощности излучения  $I/I_{\max}$  и коэффициента перекрытия пятен  $\eta$

кой нового покрытия, возможно, на основе краски, которое можно убирать с помощью щадящих методов.

Зависимость параметра шероховатости поверхности  $Ra$  титанового образца от плотности мощности излучения  $I/I_{\max}$  и коэффициента перекрытия пятен  $\eta$  приведена на рис. 6. Видно, что резкое повышение параметра шероховатости поверхности  $Ra$  более 1 мкм вызвано повреждением защитного слоя при втором проходе лазера. При первом проходе лазера режимы с высокой плотностью мощности излучения не приводят к повреждениям защитного слоя, а параметр шероховатости поверхности не превышает 0,6 мкм. В диапазоне плотности мощ-

ности излучения  $(0,3...0,6)I/I_{\max}$  параметр  $Ra$  выходит на асимптоту.

Увеличение параметра шероховатости в целом обусловлено повреждаемостью защитного слоя, так как при каждом новом проходе доля давления, отраженная защитным слоем, уменьшается. Это утверждение подтверждено в работе [13].

Зависимость деформации  $\epsilon$  титанового образца от плотности мощности излучения  $I/I_{\max}$  и коэффициента перекрытия пятен  $\eta$  приведена на рис. 7.

Определяющим для значения деформации являются плотность мощности излучения и число проходов лазера. При плотности мощности излучения до  $0,4I/I_{\max}$  деформация резко возрастает до 0,2 мм и остается неизменной до  $0,8I/I_{\max}$ .

ЛУО тонкостенных деталей необходимо проводить с малой плотностью мощности излучения (до  $0,1I/I_{\max}$ ) или с обеих сторон для компенсации изгиба. В случае обработки лопаток с обеих сторон одновременно важно делать это несимметрично, так как наложение ударных волн может привести к откольному разрушению.

## Выводы

1. Показана возможность достижения глубины ОНС до 0,7 мм при увеличении плотности мощности излучения до  $0,5I/I_{\max}$  и двух проходах лазера. После двух проходов лазера глубина ОНС возрастает до 30 %.

2. При плотности мощности излучения  $(0,40...0,86)I/I_{\max}$  уровень ОНС выходит на асимптоту. После увеличения числа проходов лазера ОНС возрастают на 10...15%.

3. Два прохода лазера позволяют получить уровень и глубину ОНС выше, чем один. Коэффициент перекрытия пятен также позволяет повысить уровень и глубину ОНС, но оказывает на них меньшее воздействие, чем число проходов.

4. Рекомендовано использовать ЛУО как промежуточную операцию перед полированием.

5. В диапазоне плотности мощности излучения  $(0,3...0,6)I/I_{\max}$  параметр шероховатости поверхности выходит на асимптоту  $Ra = 0,4$  мкм.

6. Наибольшее влияние на деформацию оказывают плотность мощности излучения и число проходов лазера. При плотности мощности из-

лучения до  $0,4I/I_{\max}$  деформация резко возрастает (до 0,2 мм) и остается неизменной до  $0,8I/I_{\max}$ .

7. Для тонкостенных объектов необходимо провести исследования по двусторонней ЛУО,

чтобы нивелировать деформацию, вызванную ЛУО. При обработке одной стороны деформация составила 0,1...0,2 мм.

## Литература

- [1] Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. *Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок*. Т. 2. Москва, Машиностроение, 2008. 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 металлческими и стеклянными микрошариками материалов ВТ9 и ЭИ787ВД. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2017, т. 13, № 8, с. 365–369.
- [4] Непейн 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. EDN: JEEASU
- [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](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] *Моделирование лазерной ударной проковки*. URL: [https://www.icmm.ru/images/pages/news/newsfiles/supersonic/seminar\\_01\\_11\\_2022/Kostina\\_et.al\\_LSP\\_2022.pdf](https://www.icmm.ru/images/pages/news/newsfiles/supersonic/seminar_01_11_2022/Kostina_et.al_LSP_2022.pdf) (дата обращения: 15.06.2024).
- [12] 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.
- [13] Зо И.М. *Ударная обработка цветных металлов и сплавов малоэнергетическими лазерными источниками*. Автореф. дисс. ... канд. тех. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. 18 с.
- [14] Wang M., Kononov 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>
- [15] 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>

- [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](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>
- [23] Цимбал А.Л. *Лазерное ударное упрочнение*. URL: [https://marbo.spb.ru/images/articles/Lazernoje\\_udarnoje\\_uprochnenie.%20Obzor.pdf](https://marbo.spb.ru/images/articles/Lazernoje_udarnoje_uprochnenie.%20Obzor.pdf) (дата обращения: 15.06.2024).

## References

- [1] Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A., Sandratskiy V.L. *Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok*. Т. 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 PNIU. 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 PNIU. 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](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 fizi-*

- ka, 2022, vol. 63, no. 2, pp. 182–191, doi: <https://doi.org/10.15372/PMTF20220217> (in Russ.). (Eng. version: *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 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] *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](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.).
- [12] 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, 2021, pp. 258–263. (In Russ.).
- [13] 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.).
- [14] 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>
- [15] 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>
- [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](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>
- [23] Tsimbal A.L. *Lazernoe udarnoe uprochnenie*. URL: [https://marbo.spb.ru/images/articles/Lazernoye\\_udarnoye\\_uprochnenie.%20Obzor.pdf](https://marbo.spb.ru/images/articles/Lazernoye_udarnoye_uprochnenie.%20Obzor.pdf) (data obrashcheniya: 15.06.2024).

## 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).

**КАРМАНОВ Вадим Владимирович** — заведующий 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 Уральского отделения РАН (614990, Пермь, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 13а, e-mail: psc@permisc.ru).

**ВШИВКОВ Алексей Николаевич** — младший научный сотрудник лаборатории термомеханики твердых тел. Институт механики сплошных сред Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения 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 Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения РАН (614013, Пермь, Российская Федерация, ул. Академика Королева, д. 1, e-mail: vshivkov.a@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 излучения лазера, количества проходов и коэффициента перекрытия зон упрочнения на уровень остаточных напряжений, глубину залегания и шероховатость в образцах из титанового сплава. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 6, с. 39–48.

### 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 laser power density, number of passes and coefficient overlap of hardening zones on the level of residual stresses, depth and roughness in titanium alloy samples. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 6, pp. 39–48.

## 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).

**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).

**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).

**PLEKHOV 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).

**VSHIVKOV Aleksey Nikolaevich** — Junior Researcher, 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: 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: vshivkov.a@icmm.ru).