

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Ширяев А.А., Габов И.Г., Миленин А.С., Таиров Д.Ф. Сравнение методов упрочнения на предел выносливости лопаток из титанового сплава // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 109–117. DOI: 10.15593/2224-9877/2023.4.11

Please cite this article in English as:

Shiryayev A.A., Gabov I.G., Milenin A.S., Tairov D.F. Comparison of hardening methods on blades of titanium alloy. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2023, vol. 25, no. 4, pp. 109-117. DOI: 10.15593/2224-9877/2023.4.11

---

**ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение**  
**Т. 25, № 4, 2023**  
**Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science**  
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

---

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2023.4.11

УДК 621.787, 620.179.18, 621.7.07, 621.789

**А.А. Ширяев<sup>1,2</sup>, И.Г. Габов<sup>1</sup>, А.С. Миленин<sup>1</sup>, Д.Ф. Таиров<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ОДК-Авиадвигатель, Пермь, Российская Федерация

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Российская Федерация

**СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ УПРОЧНЕНИЯ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ  
ЛОПАТОК ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА**

В статье рассмотрено влияние различных методов упрочнения на предел выносливости, геометрию и поверхностный слой лопаток газотурбинного двигателя.

На данный момент в авиадвигателестроительной отрасли наиболее широко применяется гидродробеструйное упрочнение. Такой метод создает благоприятную эпюру остаточных напряжений на поверхности пера лопатки и позволяет до 19 % увеличить предел выносливости. Однако глубина сжимающих остаточных напряжений при данном методе упрочнения составляет до 0,2 мм, что недостаточно для обеспечения требуемого уровня усталостной прочности лопаток при повреждении кромок типа «забоина» от попадания посторонних предметов на глубину до 1 мм.

Для повышения стойкости лопаток к попаданию посторонних предметов рассмотрены два перспективных метода упрочнения: лазерное ударное упрочнение и малопластичное выглаживание.

Для оценки эффективности каждого метода выбран объект – титановая лопатка первого каскада компрессора газотурбинного двигателя. Лазерному ударному упрочнению (LSP, LSPwC) и малопластичному выглаживанию подвергалась зона кромок лопаток шириной 5 мм. После упрочнения на часть лопаток наносились имитации повреждения типа «забоина» различной глубины и определялся их предел выносливости. Качество поверхности после упрочнения LSP и малопластичного выглаживания удовлетворяет требованиям КД по шероховатости. Глубина сжимающих остаточных напряжений при LSP и выглаживании – более 0,3 мм, что превосходит гидродробеструйную обработку.

Упрочнение кромок всеми методами привело к снижению предела выносливости лопаток без концентраторов на 9,3+15,7 %, по сравнению с лопатками без упрочнения. Упрочнение кромок приводит к увеличению предела выносливости для лопаток с забоиной глубиной 0,5 мм на 22,2+31,4 %, а для забоин глубиной 1,0 мм – на 8,3+14,8 %, по сравнению с лопатками без упрочнения с соответствующими забоинами.

**Ключевые слова:** лазер, лазерный удар, упрочнение, шероховатость, остаточные напряжения, усталость, малопластичное выглаживание, титановые сплавы, усталость, гидродробеструйная обработка.

A.A. Shiryaev<sup>1,2</sup>, I.G. Gabov<sup>1</sup>, A.S. Milenin<sup>1</sup>, D.F. Tairov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UEC-Aviadvigatel JSC, Perm, Russian Federation

<sup>2</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## COMPARISON OF HARDENING METHODS ON BLADES OF TITANIUM ALLOY

The article considers the influence of various hardening methods on the fatigue limit, geometry and surface layer of gas turbine engine blades.

At the moment, hydro-shot peening is the most widely used in the aircraft engine industry. This method creates a favorable diagram of residual stresses on the surface of the blade airfoil and makes it possible to increase the endurance limit by 19%. However, the depth of compressive residual stresses with this hardening method is up to 0.3 mm, which is not enough to provide the required level of fatigue strength of the blades in case of damage to the edges of the "nick" type from the ingress of foreign objects to a depth of 1 mm.

To increase the resistance of the blades to the ingress of foreign objects, 2 promising hardening methods are considered: laser impact hardening and low-plastic burnishing. To evaluate the effectiveness of each method, an object was chosen – a titanium blade 1 of the compressor stage of a gas turbine engine. The blade edge zone 5 mm wide was subjected to laser impact hardening (LSP, LSPwC) and low-plastic burnishing. After hardening, some of the blades were subjected to imitations of damage of the "nick" type of various depths and their endurance limit was determined. Hardening LSP and low-plastic burnishing meet the requirements of design documentation for roughness. The depth of compressive residual stresses during LSP and burnishing is more than 0.3 mm, which is superior to hydroblasting.

Edge hardening by all methods led to a decrease in the endurance limit of blades without concentrators by 9.3+15.7% compared to blades without hardening. Hardening of the edges leads to an increase in the endurance limit for blades with a dent depth of 0.5 mm by 22.2+31.4%, and for nicks with a depth of 1.0 mm – by 8.3+14.8%, compared to blades without hardening with appropriate nicks.

**Keywords:** laser, laser impact, hardening, roughness, residual stresses, fatigue, low-plastic burnishing, titanium alloys, fatigue, hydroblasting

### Введение

Элементами конструкции авиадвигателей, в значительной мере определяющими их эксплуатационные характеристики, являются рабочие лопатки и роторные детали.

Лопатки в процессе эксплуатации подвергаются циклическим (МЦУ и МнЦУ), термическим и статическим (центробежным и газодинамическим) нагрузкам.

Помимо циклических нагрузок лопатки и проточная часть авиадвигателя подвержены повреждениям от попаданий посторонних предметов (лёд, песок, птицы, мусор на ВПП и пр.).

При этом предметы, попавшие в проточную часть двигателей, повреждают лопатки каскада как низкого, так и высокого давления. Результаты взаимодействия предметов, попавших в проточную часть двигателя, с рабочими лопатками выражаются в появлении забоин по кромкам, перу и антивибрационным полкам (при наличии) лопаток, деформаций кромок, обрывов, отгибов периферийных частей и распределяются «нелинейно» по длине тракта (ступеням).

Для увеличения стойкости лопаток к повреждениям существует необходимость в повышении предела выносливости новых и поврежденных лопаток с помощью различных методов упрочняющей обработки: лазерного ударного упрочнения (LSP и LSPwC), малопластичного выглаживания [1; 2].

В исследовании рассмотрено влияние различных методов упрочнения на предел выносливости, геометрию и поверхностный слой лопаток газотурбинного двигателя.

На данный момент в авиадвигателестроительной отрасли наиболее широко применяется гидродробеструйное упрочнение. Такой метод создает благоприятную эпюру остаточных напряжений на поверхности пера лопатки и позволяет до 19 % увеличить предел выносливости. Однако глубина сжимающих остаточных напряжений при данном методе упрочнения составляет до 0,2 мм, что недостаточно для обеспечения требуемого уровня усталостной прочности лопаток при повреждении кромок типа «забоина» от попадания посторонних предметов на глубину до 1 мм.

Для повышения стойкости лопаток к попаданию посторонних предметов (ППП) рассмотрены два перспективных метода упрочнения: лазерное ударное упрочнение и малопластичное выглаживание.

Гидродробеструйная обработка (ГДО), в отличие от сухой дробеструйной обработки, исключает влияние температуры на формирование сжимающих напряжений. Суспензия, имеющая в своем составе моющие химические присадки, промывает дробь, не дает ей засаливаться, дробинки дольше не теряют круглую форму за счет смягчающего действия воды, меньше колются, снижается эффект шаржирования, внедрения металлических осколков дроби в приповерхностные слои, что приводит к снижению шероховатости. Гидродробеструйная суспензия отсеивает расколотые и некруглые дробинки. Отличительной особенностью гидродробеструйного метода упрочнения является использование в качестве энергоносителя струи сжатого воздуха и жидкости под давлением 0,1–1,0 МПа с концентрацией дроби 20÷30 %. При этом достигается снижение шероховатости от Ra

2,5 до 0,6, микротвердость упрочненного слоя увеличивается на 30–35 % при его глубине до 200÷300 мкм. В поверхностном слое образуются сжимающие остаточные напряжения величиной 700÷600 МПа [3–12].

Метод малопластичного выглаживания (LPB) представляет собой обработку поверхностного слоя шариком / шариками под гидростатическим давлением. Требуемое давление обеспечивается маслостанцией, как отдельно стоящей, так и установленной в станок с ЧПУ. Основными производителями инструмента для малопластичного выглаживания являются компании ECOROLL AG и Lambda Technologies, использующие для обработки керамический шарик из нитрида кремния с различным диаметром. В РФ серийно инструмент для малопластичного выглаживания не производится.

При LPB происходит пластическая деформация поверхностного слоя материала. Материал детали в поверхностном слое в этом случае течет, пики неровностей опускаются почти нормально к поверхности детали, заполняя впадины неровностей. Гладкая поверхность получается именно за счет течения материала в поверхностном слое, а не за счет сгиба вершин микронеровностей и их сплющивания.

Лазерное ударное упрочнение (LSP) – это перспективная технология обработки поверхности, которая создает сжимающие остаточные напряжения на поверхности и в глубине металла и, таким образом, улучшает усталостные характеристики металлических компонентов [12–22; 25]. При LSPwC обработка проводится лазером с энергией до 1 Дж и без защитного покрытия [27; 28]. При лазерном ударном упрочнении для создания ограниченной плазмы на поверхность обрабатываемой области наносится двухслойное покрытие. Оно состоит из тонкой пленки материала, не прозрачного для лазерного луча, которая размещается непосредственно на поверхности детали, и второго слоя, прозрачного для лазерного луча (вода, стекло), который помещается поверх непрозрачной пленки. Когда лазерный луч попадает на материал, он проходит через прозрачную пленку и поглощается непрозрачной пленкой, в результате чего тонкий слой материала на поверхности непрозрачной пленки испаряется. Пар продолжает поглощать энергию лазера, затем он легко нагревается и ионизируется, превращаясь в плазму. Быстро расширяющаяся плазма удерживается на поверхности материала прозрачным слоем, создавая высокое поверхностное давление, которое распространяется в материал в виде ударной волны. Результирующая ударная волна пластически деформирует

материал под поверхностью до глубины, на которой пиковое напряжение не превышает предел упругости металла, и создает сжимающие остаточные напряжения на всей глубине воздействия [24]. Главным преимуществом данной технологии является более глубокое проникновение сжимающих остаточных напряжений в материал [23].

### Методика проведения эксперимента. Образцы и оборудование

Для оценки эффективности каждого метода выбран объект – титановая лопатка первого каскада компрессора газотурбинного двигателя. Эскиз лопатки показан на рис. 1.

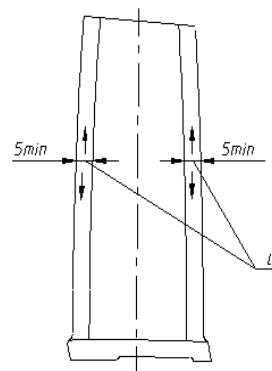


Рис. 1. Эскиз рабочей лопатки с указанием зон упрочнения кромок пера

При гидродробеструйной обработке упрочнялось перо лопатки для общего повышения предела выносливости. Упрочнению LSP, LSPwC и малопластичному выглаживанию подвергалась зона кромок лопаток шириной 5 мм. Зоны упрочнения также показаны на рис. 1.

Упрочнению подвергались зоны кромок, так как они в первую очередь подвергаются повреждениям от попаданий посторонних предметов. Согласно статистике, чаще всего встречаются повреждения на входной кромке лопаток глубиной до 1 мм, реже до 3–4 мм. Поэтому, чтобы исключить или замедлить рост трещины от повреждения, ширина зоны упрочнения составила 5 мм (рис. 2).

Лазерное ударное упрочнение проводилось двух видов: с защитным слоем (LSP) и без него (LSPwC). LSP осуществлялось твердотельным Nd:YAG-лазером Beamtch SGR-Extra-10. LSPwC проводилось лазером малой энергии. В качестве защитного слоя использовали алюминиевую фольгу. Процесс лазерного ударного упрочнения продемонстрирован на рис. 3.

LPB проводилось гидростатическим инструментом с керамическими шариками с обеих сторон лопатки на станке ЧПУ. Процесс LPB показан на рис. 4.

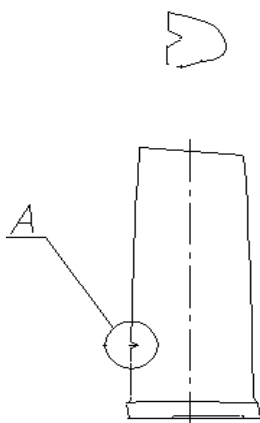


Рис. 2. Рабочая лопатка с V-образным концентратором

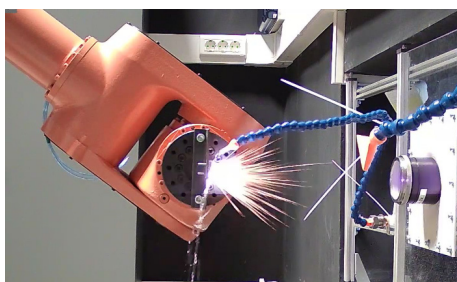


Рис. 3. Процесс лазерного ударного упрочнения



Рис. 4. Процесс малопластичного выглаживания

Гидроабразивная обработка проводилась на установке КС-150А/5D. Общий вид установки и рабочая зона приведены на рис. 5, 6.



Рис. 5. Установка гидроабразивной обработки КС-150А/5D



Рис. 6. Процесс гидродробеструйного упрочнения

Требования к упрочнению LSP и выглаживанием:

- 1) обеспечить неухудшение предела выносливости;
- 2) обеспечить благоприятную эпюру ОН на глубину до 1 мм;
- 3) обеспечить повышение предела выносливости лопаток с забоиной;
- 4) обеспечить не ухудшение геометрии и поверхностного слоя (шероховатости).

После упрочнения на часть лопаток наносились концентраторы напряжений типа «забоина» и определялся предел выносливости. Концентраторы наносились на входные кромки лопаток путем прорезания на фрезерном станке фрезой с углом заточки  $60^\circ$  и радиусом закругления  $R=0,1 \dots 0,2$  мм согласно ОСТ 1 00304 (см. рис. 2). Все параметры резания (скорость резания, подача на зуб) при нанесении концентратора были постоянными для всей партии лопаток. После нанесения концентратора его глубина была измерена глубиномером.

Концентраторы напряжений типа «забоина» наносились двух видов: с глубинами 0,5 и 1,0 мм.

Определение остаточных напряжений проводилось с помощью метода Давиденкова на установке АПООН, а также методом рентгеновской дифрактометрии на рентгеновском дифрактометре GNR StressX. Измерение шероховатости осуществлялось прибором Mahr MarSurf PS1 на базе 5,6 мм. Испытания на усталость лопаток проводились на электродинамических вибростендах ВЭДС-1500, LDS V875 при колебании по первой изгибной форме в условиях комнатной температуры ( $t=20^\circ\text{C}$ ), чтобы определить предел выносливости. Испытания велись до разрушения объекта исследований.

### Результаты эксперимента

После упрочнения в лопатках измерялись следующие параметры: шероховатость, уровень остаточных напряжений. Проводились усталостные испытания исходных лопаток, после упрочнения и упрочненных с концентраторами.

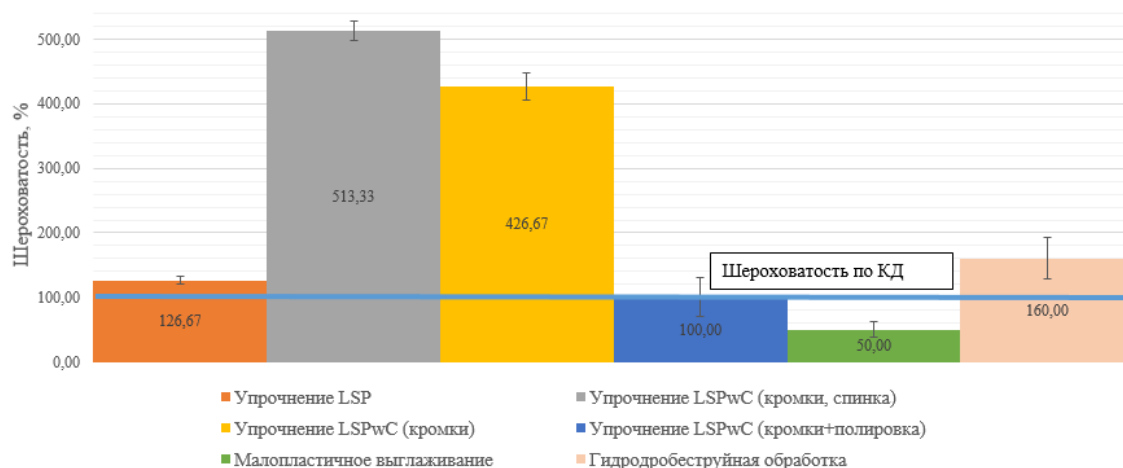


Рис. 7. Шероховатость лопаток с разными видами упрочнения

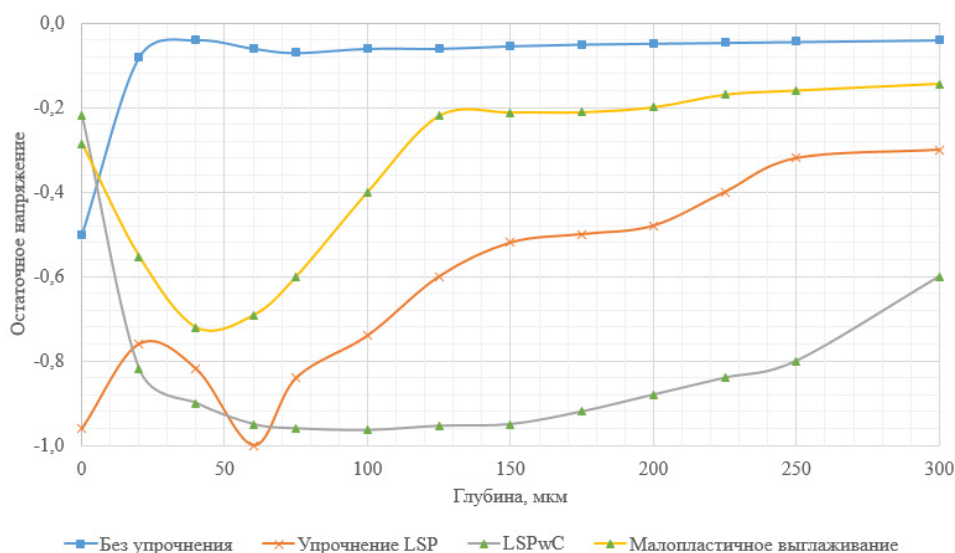


Рис. 8. Сравнение уровня остаточных напряжений по глубине лопаток

А. Шероховатость. Измерялась в 10 точках на кромках лопаток с обеих сторон, результаты представлены на рис. 7. За 100 % принята шероховатость по КД.

Упрочнение LSP и LPB удовлетворяют требованиям КД по шероховатости

Б. Геометрия. При ГДО изменения геометрии пера не превышают требований КД.

Наибольшая деформация наблюдается после LSPwC на верхней кромке со стороны спинки. LPB приводит к короблению и утонению входных и выходных кромок на поверхности лопаток, может наблюдаться продавливание кромки шариком.

В. Остаточные напряжения (ОН). Определение уровня ОН на поверхности лопаток производилось с помощью дифрактометрического метода в 5 точках на кромках спинки и корыта. По глубине ОН определялись методом Давиденкова на

образцах, вырезанных из кромок. Результаты представлены на рис. 8. За «-1» принят максимальный уровень сжимающих ОН в лопатках после упрочнения.

Глубина сжимающих остаточных напряжений для всех видов упрочнения – свыше 0,3 мм.

При LSP уровень сжимающих ОН на глубине 0–60 мкм резко увеличивается и уменьшается, достигает максимума на глубине 60 мкм и затем плавно уменьшается до глубины 300 мкм.

При LSPwC уровень сжимающих ОН на глубине 0–100 мкм резко уменьшается, достигает максимума на глубине 100 мкм и затем плавно уменьшается до глубины 300 мкм.

При LPB уровень сжимающих ОН резко увеличивается на глубине от 0 до 45 мкм, достигает максимума на глубине 45 мкм и затем плавно уменьшается до глубины 300 мкм.

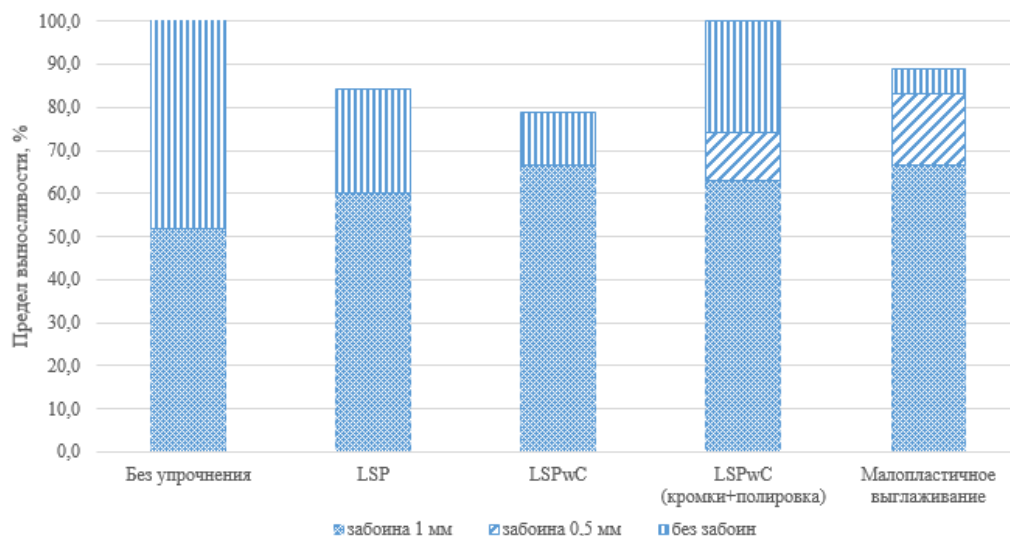


Рис. 9. Сравнительные результаты испытаний на усталость лопаток

Г. Предел выносливости. Предел выносливости лопаток для каждой группы определялся на 5 образцах. Результаты усталостных испытаний лопаток представлены на рис. 9. За 100 % принят предел выносливости лопатки без упрочнения и без забоин.

Пределы выносливости лопаток без упрочнения при забоинах глубиной 0,5 и 1 мм совпадают.

На лопатки без упрочнения и с упрочнением методами LSP, LSPwC забойна 0,5 мм не наносилась.

Глубина наведения сжимающих остаточных напряжений приводит к положительному эффекту влияния упрочнения на стойкость лопаток к концентраторам типа «забойна». Это связано с тем, что сжимающие ОН препятствуют дальнейшему развитию трещины при повреждении. Каждая технология упрочнения приводит к наведению в поверхностном слое сжимающих ОН. Наибольшая глубина сжимающих ОН у лазерного ударного упрочнения и LPB – более 0,3 мм.

Упрочнение привело к снижению предела выносливости лопаток без концентраторов на 9,3÷15,7 %, по сравнению с лопатками без упрочнения.

Упрочнение приводит к увеличению предела выносливости для лопаток с забойной глубиной 0,5 мм на 22,2÷31,4 % и для забоин глубиной 1,0 мм – на 8,3÷14,8 %, по сравнению с неупрочненными лопатками с соответствующими забоинами.

### Заключение

1. Упрочнение кромок лопаток привело к снижению базового предела выносливости без концентраторов на 9,3...15,7 %, по сравнению с таковыми у исходных лопаток.

2. Нанесение концентратора напряжений типа «забойна» глубиной до 1,0 мм на кромку, имитирующего попадание постороннего предмета, приводит к снижению предела выносливости лопаток без упрочнения примерно в 2 раза. Внедрение перспективных методов упрочнения кромок позволяет значительно повысить усталостную прочность лопаток с концентраторами напряжений, увеличение предела выносливости с «забойной» глубиной до 1,0 мм возрастает на 8,3...14,8 %.

3. Показана принципиальная возможность повышения стойкости лопаток к попаданию посторонних предметов при упрочнении кромок методами лазерного удара и малопластичного выглаживания. Необходимо продолжить отработку указанных технологий с целью обеспечения базового значения предела выносливости лопаток.

### Библиографический список

- Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
- Шведова А.С. Повышение эксплуатационных свойств деталей при обработке динамическими методами поверхностного пластического деформирования // Вестник ДГТУ. – 2015. – № 1(80). – С. 114–120.
- Павлов В.Ф., Кирпичёв В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей по остаточным напряжениям. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2012. – 125 с.
- Влияние гидродробеструйной обработки на предел выносливости образцов с надрезом при изгибе и растяжении-сжатии / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичев, В.С. Василук, В.П. Сазанов, П.А. Шляпников // Динамика и виброакустика. – 2020. – Т. 6, № 1. – С. 25–34. DOI: 10.18287/2409-4579-2020-6-1-25-34



5. Павлов В.Ф., Сазанов В.П., Вакулук В.С. К вопросу оценки влияния гидродробеструйной обработки на предел выносливости деталей по первоначальным деформациям // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 55–62. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.1.08
6. Влияние гидродробеструйной обработки на предел выносливости образцов различного диаметра из стали 45 / В.Ф. Павлов, В.С. Василук, В.А. Кирпичев, В.П. Сазанов, А.А. Декань, О.Ю. Семенова // Инновационные направления интеграции науки, образования и производства, Керчь. – 2022. – С. 85–89.
7. Альбов И.И., Бурнашов М.А. Упрочнение поверхностей водолеяными струями высокого давления // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 2/3 (286). – С. 76–78.
8. Мифтахов А.А., Мазин П.Г. Моделирование остаточных напряжений при гидродробеструйной обработке // Известия Челябинского научного центра. – 2006. – № 4(34). – С. 38–42.
9. Петросов В.В. Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента. – М., 1977. – 168 с.
10. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
11. Синчурин Д.В. Влияние метода гидродробеструйного упрочнения на повышение эксплуатационной надежности деталей. – 2015. – № 21.2 (101.2). – С. 54–57.
12. Гидродробеструйный метод упрочнения деталей ГТД основанный на пластическом деформировании поверхностного слоя [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.gidroabraziv.com/technology/gidrodobestrujnyj-metod-uprochneniya-detalej-gtd/> (дата обращения: 10.09.2021).
13. Лазерное ударное упрочнение титанового сплава ВТ6 с алюминиевым абляционным покрытием / М.А. Ляховецкий, Д.Д. Королев, Г.Д. Кожевников, М.В. Волков // Быстрозакаленные материалы и покрытия: сб. статей. – М., 2021. – С. 258–263.
14. Experimental and numerical investigation of residual stresses in laser shock peened AA2198 / S. Keller, S. Chupakhin, P. Staron, E. Maawad, N. Kashaev, B. Klusemann // Journal of Materials Processing Tech.– 2018. – Vol. 255. – P. 294–307.
15. 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. – № 88. – P. 1557–1565. DOI: 10.1007/s00170-016-8873-0
16. Горунев 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: 10.17073/1997-308X-2015-4-40-44
17. Муратаев Ф.И., Клабуков М.А. Особенности лазерного ударного упрочнения сталей и титановых сплавов // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2012. – № 4, вып. 2. – С. 82–84.
18. Study on effect of laser shock peening as a pre-treatment on fatigue performance of hard-chrome plated 15–5 PH stainless steel / R. Sundar, P. Ganesh, Swati Maravi, Pushpendra K. Dwivedi, K.G. Ram, D.C. Nagpure, K. Ranganathan, Abhijit C., K.S. Bindra, R. Kaul // Lasers in Manufacturing and Materials Processing. – 2019. – № 6. – P. 85–97. DOI:10.1007/s40516-019-0082-x
19. Laser shock peening wavelength conditions for enhancing corrosion behaviour of titanium alloy in chloride environment / G.R. Kumar, G. Rajyalakshmi, S. Swaroop, S.A.X. Stango, U. Vijayalakshmi // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2019. – № 41. – P. 129. DOI:10.1007/s40430-019-1633-y
20. Laser Shock Peening and its Applications: A Review / R. Sundar, P. Ganesh, K.G. Ram, G. Ragvendra, B.K. Pant, K. Vivekanand, K. Ranganathan, K. Rakesh, K.S. Bindra // Lasers in Manufacturing and Materials Processing. – 2019. – № 6. – P.424–463. DOI: 10.1007/s40516-019-00098-8
21. Effects of shot-peening and re-shot-peening on four-point bend fatigue behavior of Ti–6Al–4V / X.P. Jiang, C.S. Man, M.J. Shepard, T. Zhai // Mat Sci and Engg A. – 2007. – № 468. – P. 137–143.
22. 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. – № 44. – P. 292–302.
23. Шиганов И.Н., Мельников Д.М., Мвят З.Й. Лазерное ударное упрочнение алюминиевых материалов // Лазеры в науке, технике, медицине: сб. статей. – М., 2017. – Т. 28. – С. 43–47.
24. Конечно-элементный анализ остаточных напряжений, возникающих в результате лазерной ударной проковки титанового сплава ВТ6 / О.А. Плехов, А.А. Костина, Р.И. Изюмов, А.Ю. Изюмова // Вычислительная механика сплошных сред. – 2022. – Т. 15, № 2. – С. 171–184.
25. Моделирование остаточных напряжений, созданных методом лазерного ударного упрочнения / Р.А. Сихамов, Ф. Фомин, З. Келлер, Н. Кашаев // Научно-практический электронный журнал Аллея Науки. – 2019. – Т. 2, № 6. – С. 18–25.
26. Sakhvadze G.Zh. Simulation of the technology of laser-shock-wave processing of titanium alloys with shape memory using dimensional analysis // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2021. – Vol. 50, № 4. – P. 332–341.
27. Laser peening without coating as a surface enhancement technology / Y. Sano, K. Akita, K. Masaki, Y. Ochi, I. Alterberg, B. Schoites // Pulse. – 2006. – № 100(40).
28. Guiba A.K., Medraj M. Laser peening process and its impact on materials properties in comparison with shot peening and ultrasonic impact peening // Materials. – 2014. – № 7(12). – P. 7925–7974.

## References

1. Sulima A.M., Shulov V.A., Iagodkin Iu.D. Pov-erkhnostnyi sloi i ekspluatatsionnye svoistva detalei mashin [Surface layer and performance properties of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie, 1988, 240 p.
2. Shvedova A.S. Povyshenie ekspluatatsionnykh svoistv detalei pri obrabotke dinamicheskimi metodami pov-

erkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniia [Increase of operational properties of parts during machining by dynamic methods of surface plastic deformation]. *Vestnik DGTU*, 2015, no. 1(80), pp. 114–120.

3. Pavlov V.F., Kirpichev V.A., Vakuliuk V.S. Prognozirovanie soprotivleniia ustalosti poverkhnostno uprochnennykh detalei po ostatochnym napriazheniiam [Prediction of fatigue resistance of surface hardened parts by residual stresses]. Samara: Izdatelstvo SNTs RAN, 2012, 125 p.

4. Pavlov V.F., Kirpichev V.A., Vasiliuk V.S., Sazanov V.P., Shliapnikov P.A. Vliianie gidrodrobestruinoi obrabotki na predel vynoslivosti obraztsov s nadrezom pri izgibe i rastiiazhenii-szhatii [Effect of hydroblasting on the bending and tension-compression endurance of notched specimens]. *Dinamika i vibroakustika*, 2020, vol. 6, no. 1, pp. 25–34. DOI: 10.18287/2409-4579-2020-6-1-25-34

5. Pavlov V.F., Sazanov V.P., Vakuliuk V.S. K voprosu otsenki vliianiia gidrodrobestruinoi obrabotki na predel vynoslivosti detalei po pervonachal'nym defor-matsiiam [Evaluation of the influence of hydroblasting on the endurance limit of parts based on initial deformations]. *Vestnik PNIPIU. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 55–62. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.1.08

6. Pavlov V.F., Vasiliuk V.S., Kirpichev V.A., Sazanov V.P., Dekan' A.A., Semenova O.Iu. Vliianie gidrodrobestruinoi obrabotki na pre-del vynoslivosti obraztsov razlichnogo diametra iz stali 45 [Influence of hydroblasting on the endurance limit of specimens of different diameters made of steel 45]. *Innovatsionnye napravleniia integratsii nauki, obrazovaniia i proizvodstva, Kerch'*, 2022, pp. 85–89.

7. Al'bov I.I., Burnashov M.A. Uprochnenie poverkhnostei vodoledianymi struiami vysokogo davleniia [Surface hardening with high-pressure ice jets]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*, 2011, no. 2/3 (286), pp. 76–78.

8. Miftakhov A.A., Mazein P.G. Modelirovanie ostatochnykh napriazhenii pri gidrodrobestruinoi obrabotke [Modeling of residual stresses during hydro-blasting operations]. *Izvestiia Cheliabinskogo nauchnogo tsentra*, 2006, no. 4(34), pp. 38–42.

9. Petrosov V.V. Gidrodrobestruinoe uprochnenie detalei i instrumenta [Hydroblast peening of parts and tools]. Moscow, 1977, 168 p.

10. Odintsov L.G. Uprochnenie i otdelka detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem: spravochnik [Strengthening and finishing of parts by surface plastic deformation: reference book.]. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 328 p.

11. Sinchurin D.V. Vliianie metoda gidrodrobestruinogo uprochneniia na povyshenie ekspluatatsionnoi nadezhnosti detalei [Influence of hydroblast peening method on increasing operational reliability of parts], 2015, no. 21.2 (101.2), pp. 54–57.

12. Gidrodrobestruinyi metod uprochneniia detalei GTD osnovannyi na plasticheskom deformirovanii poverkhnostnogo sloia [Elektronnyi resurs]. [Hydrodroblast method of hardening of GTE parts based on plastic deformation of the surface layer [Electronic resource]]. URL: <https://www.gidroabraziv.com/technology/gidrodrobestruinyj-metod-uprochneniya-detalej-gtd/> (data available 10.09.2021).

13. Liakhovetskii M.A., Korolev D.D., Kozhevnikov G.D., Volkov M.V. Lazernoe udarnoe uprochnenie titanovogo splava VT6 s aliuminievyim abliatsionnym pokrytiem [Laser shock hardening of titanium alloy VT6 with aluminum ablation coating]. *Bystrozakalennye materialy i pokrytiia: sbornik statei*. Moscow, 2021, pp. 258–263.

14. Keller S., Chupakhin S., Staron P., Maawad E., Kashaev N., Klusemann B. Experimental and numerical investigation of residual stresses in laser shock peened AA2198. *Journal of Materials Processing Tech.*, 2018, vol. 255, pp. 294–307.

15. 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, no. 88, pp. 1557–1565. DOI: 10.1007/s00170-016-8873-0

16. Gorunov A.I., Gil'mutdinov A.Kh. Uprochnenie i naplavka volokonnykh lazerom kak sposoby tselenapravlenno formirovaniia struktury i svoistv titanovogo splava VT6 [Strengthening and cladding by fiber laser as methods of purposeful formation of structure and properties of titanium alloy BT6]. *Izvestiia vuzov. Poroshkovaia metallurgii i funktsional'nye pokrytiia*, 2015, no. 4, pp. 40–44. DOI: 10.17073/1997-308X-2015-4-40-44

17. Murataev F.I., Klabukov M.A. Osobennosti lazernogo udarnogo uprochneniia stali i titanovykh splavov [Features of laser shock hardening of steels and titanium alloys]. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva*, 2012, no. 4, iss. 2, pp. 82–84.

18. Sundar R., Ganesh P., Swati Maravi, Pushpendra K. Dwivedi, Ram K.G., Nagpure D.C., Ranganathan K., Abhijit C., Bindra K.S., Kaul R. Study on effect of laser shock peening as a pre-treatment on fatigue performance of hard-chrome plated 15–5 PH stainless steel. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2019, no. 6, pp. 85–97. DOI:10.1007/s40516-019-0082-x

19. Kumar G.R., Rajyalakshmi G., Swaroop S., Stango S.A.X., Vijayalakshmi U. Laser shock peening wavelength conditions for enhancing corrosion behaviour of titanium alloy in chloride environment. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2019, no. 41, p. 129. DOI:10.1007/s40430-019-1633-y

20. Sundar R., Ganesh P., Ram K.G., Ragvendra G., Pant B.K., Vivekanand K., Ranganathan K., Rakesh K., Bindra K.S. Laser Shock Peening and its Applications: A Review. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2019, no. 6, pp.424–463. DOI:10.1007/s40516-019-00098-8

21. Jiang X.P., Man C.S., Shepard M.J., Zhai T. Effects of shot-peening and reshot-peening on four-point-bend fatigue behavior of Ti–6Al–4V. *Mat Sci and Engg A.*, 2007, no. 468, pp. 137–143.

22. 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.

23. Shiganov I.N., Mel'nikov D.M., M'iat Z.I. Lazernoe udarnoe uprochnenie aliuminievykh materialov [Laser shock hardening of aluminum materials]. *Lazery v nauke, tekhnike, meditsine: sbornik statei*, Moscow, 2017, vol. 28, pp. 43–47.



24. Plekhov O.A., Kostina A.A., Iziyomov R.I., Iziyomova A.Iu. Konechno-elementnyi analiz ostatochnykh napriazhenii, vznikaiushchikh v rezul'tate lazernoi udarnoi prokovki titanovogo splava VT6 [Finite element analysis of residual stresses resulting from laser shock forging of titanium alloy VT6]. *Vychislitel'naia mekhanika sploshnykh sred*, 2022, vol. 15, no. 2, pp. 171–184.

25. Sikhamov R.A., Fomin F., Keller Z., Kashaev N. Modelirovanie ostatochnykh napriazhenii, so-zdannykh metodom lazernogo udarnogo uprochneniia [Modeling of residual stresses co-created by laser shock hardening method]. *Nauchno-prakticheskii elektronnyi zhurnal Alleia Nauki*, 2019, vol. 2, no. 6, pp. 18–25.

26. Sakhvadze G.Zh. Simulation of the technology of laser-shock-wave processing of titanium alloys with shape memory using dimensional analysis. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2021, vol. 50, no. 4, pp. 332–341.

27. Sano Y., Akita K., Masaki K., Ochi Y., Alterberg I., Schoites B. Laser peening without coating as a surface enhancement technology. *Pulse*, 2006, no. 100(40).

28. Guiba A.K., Medraj M. Laser peening process and its impact on materials properties in comparison with shot peening and ultrasonic impact peening. *Materials*, 2014, no. 7(12), pp. 7925–7974.

Поступила: 19.07.2023

Одобрена: 02.10.2023

Принята к публикации: 27.10.2023

### Об авторах

**Ширяев Алексей Александрович** (Пермь, Российская Федерация) – инженер КО-2993 АО «ОДК-Авиадвигатель» (Российская Федерация, 614990, Пермь, Комсомольский пр., 93, e-mail: alex\_sh\_23-1@mail.ru).

**Габов Иван Григорьевич** (Пермь, Российская Федерация) – начальник отделения 299 АО «ОДК-Авиадвигатель» (Российская Федерация, 614990, Пермь, Комсомольский пр., 93, e-mail: gabov-ig@avid.ru).

**Миленин Артем Сергеевич** (Пермь, Российская Федерация) – начальник отдела КО-2993 АО «ОДК-Авиадвигатель» (Российская Федерация, 614990, Пермь, Комсомольский пр., 93, e-mail: milenin-as@avid.ru).

**Тайров Денис Фанисович** (Пермь, Российская Федерация) – начальник бригады КО-2993 АО «ОДК-Авиадвигатель» (Российская Федерация, 614990, Пермь, Комсомольский пр., 93, e-mail: tairov@avid.ru).

### About the authors

**Alexey A. Shiryayev** (Perm, Russian Federation) – Engineer КО-2993, JSC UEC-Aviadvigatel (93, Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: alex\_sh\_23-1@mail.ru).

**Ivan G. Gabov** (Perm, Russian Federation) – Department head 299, JSC UEC-Aviadvigatel (93, Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: gabov-ig@avid.ru).

**Artem S. Milenin** (Perm, Russian Federation) – Department head КО-2993, JSC UEC-Aviadvigatel (93, Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: milenin-as@avid.ru).

**Denis F. Tairov** (Perm, Russian Federation) – Head of the brigade of КО-2993, JSC UEC-Aviadvigatel (93, Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: tairov@avid.ru).

**Финансирование.** Работа не имела спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад всех авторов** равноценен.