

УДК 621.787, 620.179.18, 621.7.07, 621.789

Влияние методов упрочнения на усталостную прочность лопаток компрессора с концентраторами напряжений

А.А. Ширяев, А.С. Миленин

АО «ОДК-Авиадвигатель»

Hardening methods influence on fatigue strength of the compressor blades with stress concentrators

A.A. Shiryayev, A.S. Milenin

UEC-Aviadvigatel JSC

Исследовано влияние различных методов упрочнения на усталостную прочность лопаток компрессора газотурбинного двигателя из титанового сплава с концентраторами напряжений. Зоны кромок пера лопаток шириной 5 мм упрочнены методами лазерного ударного удара (LSP, LSPwC) и малопластичного выглаживания. Для упрочнения лопаток с обеих сторон методом LSP использован твердотельный лазер Nd:YAG. В качестве защитного слоя применена алюминиевая фольга толщиной 80 мкм. Малопластичное выглаживание выполнено гидростатическим инструментом на станке с числовым программным управлением. Определены пределы выносливости лопаток без упрочнения (серийных) и с упрочнением, а также лопаток обеих групп с нанесенными концентраторами напряжений (имитацией повреждений) типа забоины разной глубины на входной кромке. Установлено, что обработка входной кромки лопаток различными методами упрочнения снижает эффективный коэффициент концентрации напряжений в 1,2–2,0 раза относительно такового для лопаток без упрочнения. Анализ изломов после упрочнения показал, что глубина упрочненного слоя составляет 0,6...1,0 мм. Разрушение после упрочнения становится подслоинным, очаг развития трещин совпадает с границей слияния зон при упрочнении с обеих сторон. Выявлено, что забоина глубиной до 0,5 мм почти не снижает усталостных свойств упрочненных лопаток в зоне концентрации напряжений. Внедрение лазерного ударного упрочнения позволит уменьшить количество зачисток лопаток и преждевременного съема газотурбинного двигателя с эксплуатации.

EDN: QTMYIH, <https://elibrary/qtmyih>

Ключевые слова: лазерное ударное упрочнение, повышение предела выносливости, лопатки компрессора, малопластичное выглаживание, эффективный коэффициент концентрации напряжений, исследование изломов лопаток

The paper analyzes the influence of different hardening methods on fatigue strength of the gas turbine engine compressor blades made of titanium alloy with stress concentrators. The 5 mm wide blade feather edge zones were hardened using the laser shock peening (LSP, LSPwC) and low-plasticity smoothing methods. The solid-state Nd:YAG laser was used to harden the blades on both sides by the LSP method. The 80 μm thick aluminum foil was used as the protective layer. Low-plasticity smoothing was performed using a hydrostatic tool on the CNC machine. Endurance limits were determined for blades without hardening (serial) and with hardening, as well as for blades of both groups with

applied stress concentrators (damage imitation) such as a nick of different depth on the leading edge. The paper states that the blade leading edge machining by different hardening methods reduces the effective stress concentration factor by 1.2–2.0 times relative to that of blades without hardening. Fracture analysis after hardening shows that the hardened layer depth could be 0.6...1.0 mm. Destruction after hardening becomes sublayer, the crack development source coincides with the zones merger boundary during hardening on both sides. The paper shows that nicks about 0.5 mm deep almost do not reduce fatigue properties of the hardened blades in the stress concentration zone. Introduction of the laser shock peening would reduce the number of blade stripping and premature removal of the gas turbine engine.

EDN: QTMYIH, <https://elibrary/qtmyih>

Keywords: laser shock peening, increasing the fatigue limit, compressor blades, low-plasticity smoothing, effective stress concentration factor, blade fracture study

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

Лопатки в процессе эксплуатации подвержены циклическим (мало- и многоциклового усталости), термическим и статическим (центробежным и газодинамическим) нагрузкам, а также повреждениям от попаданий посторонних предметов (льда, песка, птиц, мусора на взлетно-посадочной полосе и т. п.) [1].

Попадание посторонних предметов в проточную часть газотурбинного двигателя (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 распределены по длине тракта (ступеням). 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.

Для повышения стойкости лопаток к попаданию посторонних предметов используют как традиционные методы (поверхностное пластическое деформирование) [2–6], так и методы на основе воздействия излучения разного вида (магнитного, нейтронного) [7, 8]. Наиболее широко применяют гидродробеструйную обра-

ботку. Однако при таких методах упрочнения глубина остаточных напряжений сжатия (ОНС) не превышает 0,2 мм, чего недостаточно, так как глубина забоины может достигать 1 мм.



а



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)

Метод малопластичного выглаживания (Low Plasticity Burnishing — LPB) представляет собой обработку поверхностного слоя инструментом под гидростатическим давлением (рис. 2). Требуемое давление обеспечивает маслостанция. Основными производителями инструмента для LPB являются компании ECOROLL AG [9] и Lambda Technologies [10], использующие для обработки керамический шарик из нитрида кремния разного диаметра. В России серийное производство инструмента для LPB отсутствует.

В публикации [5] проведено сравнение шероховатости поверхности в зависимости от финишной обработки: шлифования, полирования и других операций. Проанализированы варьируемые параметры при накатке. Установлено, что самыми распространенными типами смазочно-охлаждающей жидкости являются дизельное топливо, керосин и SAE-масла.

Чаще всего работы связаны с алюминиевыми и стальными сплавами, реже — с титановыми и жаропрочными. В качестве основных контролируемых параметров после упрочнения выступают шероховатость и микротвердость поверхности [4–6, 9], иногда контролируют ОНС и микроструктуру [4, 5].

Метод LPB оптимально использовать как предварительную операцию перед диффузионной обработкой [11], что увеличивает глубину диффузионной зоны и усталостную долговечность (на 15 %).

Существуют работы, посвященные исследованию влияния покрытия режущего инструмента и криогенных условий на шероховатость поверхности, например [12]. Стратегия смазывающего охлаждения жидким азотом при обработке сплава Ti-6Al-4V приводит к незначительному улучшению шероховатости поверхно-

сти (0,35 мкм) по сравнению с исходной (0,32 мкм) [12].

Некоторые авторы видят дальнейшее развитие метода LPB в добавлении ультразвукового воздействия частотой 20...40 кГц [13, 14], что позволяет увеличить глубину наклепанного слоя до 0,5 мм.

Лазерное ударное упрочнение (Laser Shock Peening — LSP) — технология обработки поверхности детали, где под действием лазерных импульсов на ней генерируется плазма, при увеличении давления которой возникают ударные волны, распространяющиеся вглубь материала [15–17].

Достоинства метода LSP заключаются в наведении ОНС на глубину до 1 мм и в возможности обработки сложнопрофильных поверхностей. Схема упрочнения методом LSP приведена на рис. 3 [15]. В качестве защитного покрытия используют алюминиевую фольгу, ленту ПВХ, черную краску и другие материалы. Удерживающим слоем, как правило, служит слой воды толщиной до 1 мм.

Подвидами LSP являются обработка без защитного покрытия (LSPwC) [18–20], при которой используют лазер с энергией до 1 Дж [21–23], упрочнение предварительно нагретой детали (WLSP) [22] и обработка под углом [23].

Метод LSP 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) [15]. Обработке подвергают перо лопаток, контактные поверхности замковых соединений роторных деталей и зоны концентрации напряжений.

Ввиду специфики деталей, упрочняемых методом LSP, исследования чаще проводят на

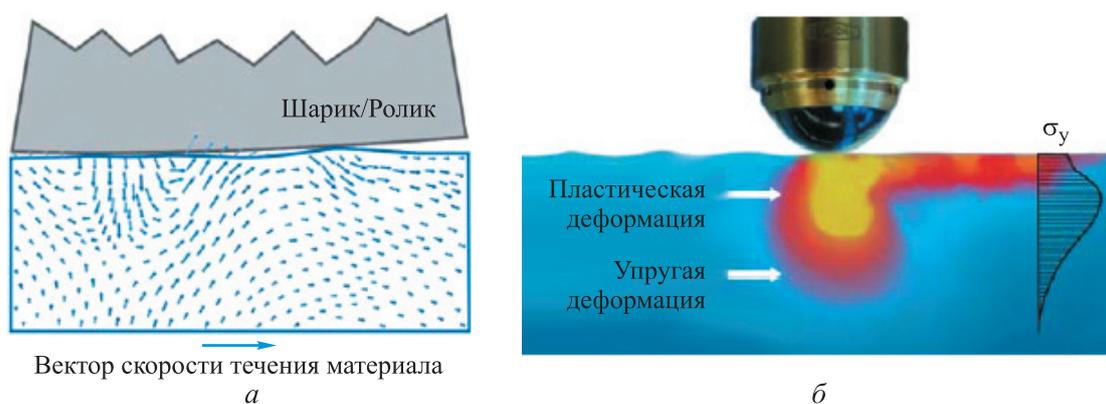


Рис. 2. Схема (а) и модель (б) процесса упрочнения поверхности детали методом LPB [7]

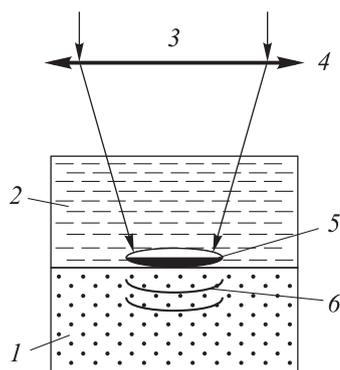


Рис. 3. Схема упрочнения поверхности детали методом LSP:

1 — металлическая деталь; 2 — вода; 3 — лазер;
4 — собирающая линза; 5 — плазма; 6 — ударные волны

алюминиевых и титановых сплавах, реже — на никелевых сплавах, сталях и других материалах.

Основными контролируемыми параметрами после упрочнения методом LSP являются глубина и уровень ОНС [21, 24], микротвердость и микроструктура [21], мало- и многоцикловая усталость [25].

Установлено, что глубина ОНС в образцах из сплава ВТ6 может достигать 0,7 мм. Увеличение глубины ОНС приводит к повышению усталостной прочности в 1,5...2,0 раза [19, 25].

В то же время нет исследований о том, как метод LSP влияет на предел выносливости объекта с забоиной.

В России исследованием метода LSP занимаются в ИМСС УрО РАН [16], МАИ [24] и МГТУ им. Баумана [26], ЦИАМ [15] и АО «ОДК-Авиадвигатель» [17, 27].

Цель работы — оценить эффективность методов LPB и LSP на стойкость лопаток компрессора к повреждениям входной кромки (влияние на предел выносливости) и исследовать изломы лопаток компрессора после усталостных испытаний.

Материалы и методы. Для оценки эффективности рассматриваемых методов упрочнения выбран объект — титановая лопатка компрессора ГТД, эскиз которой показан на рис. 4.

Упрочняли зоны кромок рабочей лопатки, так как они подвержены повреждениям от попаданий посторонних предметов (льда, песка, птиц, мусора на взлетно-посадочной полосе и др.). Согласно статистике, чаще всего встречаются повреждения на входной кромке лопаток глубиной до 1 мм, реже — до 3...4 мм. Чтобы исключить или замедлить рост трещины от

повреждения ширину зоны упрочнения L выбрали равной 5 мм. Упрочняющую обработку проводили с обеих сторон.

Определяли пределы выносливости лопаток без упрочнения (серийных) и с упрочнением, а также лопаток обеих групп с нанесенными концентраторами напряжений (имитацией повреждений) типа забоины разной глубины на входной кромке (рис. 5).

На входную кромку наносили концентраторы путем прорезания на фрезерном станке фрезой с углом заточки 60° и радиусом закругления $R = 0,1...0,2$ мм. Параметры резания (скорость резания и подача на зуб) при нанесении концентратора были постоянными для всей партии лопаток. Фактические значения глубины концентраторов h укладывались в диапазон, предписываемый требованиями ОСТ 1 00304-79 для проведения лабораторных усталостных испытаний.

Фрагменты процесса упрочнения лопатки методами LSP и LPB показаны на рис. 6, а и б.

Морфологию поверхностей изломов лопаток после обработки проводили с помощью микроскопа MIRA3 TESCAN.

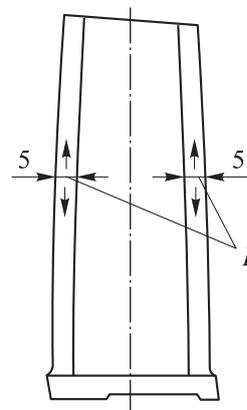


Рис. 4. Эскиз титановой рабочей лопатки

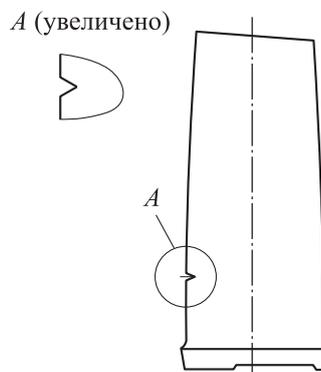


Рис. 5. Схема рабочей лопатки с V-образным концентратором

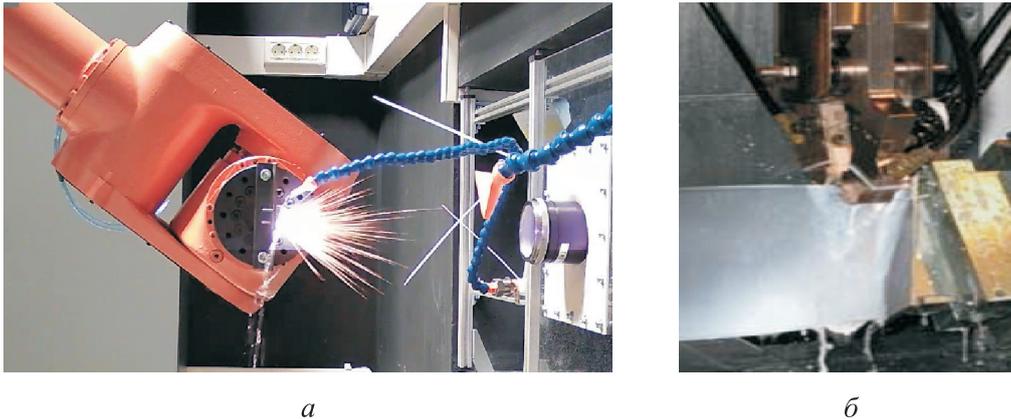


Рис. 6. Фрагменты процесса упрочнения лопатки методами LSP (а) и LPB (б)

Результаты и обсуждение. Снижение усталостной прочности лопаток с повреждениями характеризуется эффективным коэффициентом концентрации напряжений K_σ и коэффициентом чувствительности к концентрации напряжений q :

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1}^k}; \quad q = \frac{K_\sigma - 1}{\alpha_\sigma - 1},$$

где σ_{-1} и σ_{-1}^k — пределы выносливости лопатки без концентратора и с ним, МПа; α_σ — теоретический коэффициент концентрации напряжений.

Увеличение уровня локальных напряжений в месте повреждения характеризуется теоретическим коэффициентом концентрации напряжений α_σ , который зависит от геометрических характеристик лопатки, концентратора и вида напряженного состояния.

Построены зависимости эффективного коэффициента концентрации напряжений K_σ и коэффициента чувствительности к ним q от

относительной глубины концентратора $h_{отн} = h_{заб}/h_{кр}$ (рис. 7, а и б). Здесь $h_{заб}$ — глубина концентратора, мм; $h_{кр}$ — толщина кромки лопатки, мм.

После упрочнения входной кромки пера лопаток разными методами эффективный коэффициент концентрации напряжений K_σ уменьшился в 1,2–2,0 раза относительно такового для неупрочненных лопаток. Чувствительность к концентрации напряжений упрочненных лопаток ($q = 0,02...0,15$) оказалась значительно ниже, чем у лопаток, изготовленных по серийной технологии ($q = 0,24...0,44$).

Определение предела выносливости лопаток. Для каждой группы лопаток предел выносливости определяли на пяти образцах. Результаты усталостных испытаний лопаток приведены на рис. 8. За 100 % принят предел выносливости лопатки без упрочнения, не имеющей забоин.

Пределы выносливости лопаток без упрочнения при забоинах глубиной 0,5 и 1,0 мм сов-

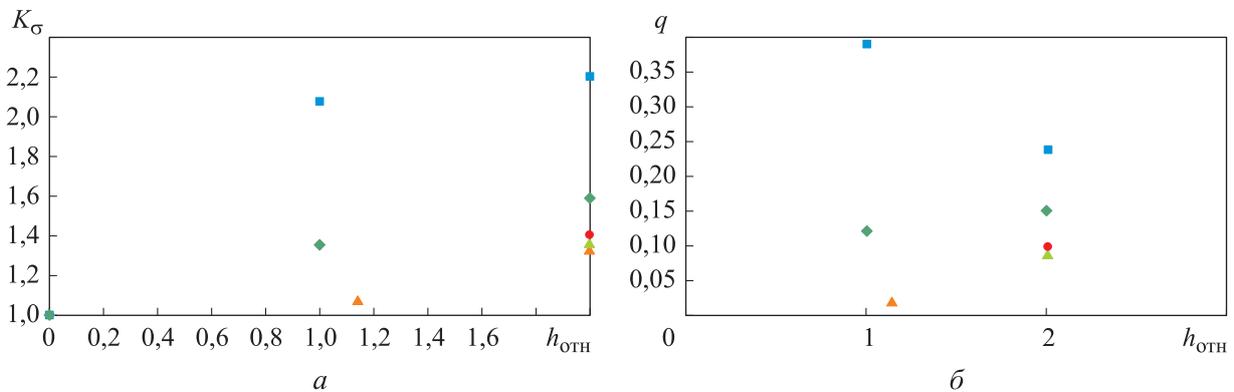


Рис. 7. Зависимости эффективного коэффициента концентрации напряжений K_σ (а) и коэффициента чувствительности к ним q (б) от относительной глубины концентратора $h_{отн}$ для неупрочненной (■) и упрочненной различными методами входной кромки пера лопаток: ▲ — LPB; ● — LSP; ▲ — LSPwC; ◆ — LSPwC + полировка

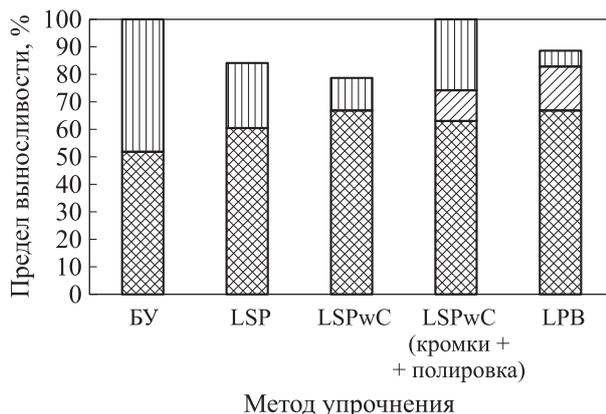


Рис. 8. Результаты испытаний на усталость лопаток (БУ — без упрочнения):

— забоина 1 мм;
 — забоина 0,5 мм;
 — без завоин

падают. На лопатки с упрочнением методами LSP и LSPwC забоину 0,5 мм не наносили.

Увеличение глубины наведения ОНС оказывает положительное влияние на стойкость лопаток к концентраторам типа завоины. Это связано с тем, что ОНС препятствуют дальнейшему развитию трещины при повреждении.

У упрочненных лопаток без концентратора предел выносливости оказался на 9,3...15,7 % ниже, чем у неупрочненных. После упрочнения лопаток с забоиной глубиной 0,5 мм предел выносливости повысился на 22,2...31,4 %, а с забоиной глубиной 1,0 мм — на 8,3...14,8 %.

Исследование изломов лопаток. Проведено исследование изломов лопаток. Разрушение после упрочнения является подслоиным, так как при использовании методов LSP и LPB наводятся высокие ОНС в кромке лопатки со стороны спинки и корыта. Виды изломов (полученных Г.И. Сарваровой) приведены на рис. 9, а и б.

У всех лопаток, упрочненных методом LPB, очаг развития трещин подповерхностный (см. рис. 9, б) и расположен на расстоянии 1,8...2,2 мм от входной кромки и на одинаковом расстоянии от поверхности спинки и корыта (примерно 0,5...0,6 мм соответственно). Очаг совпадает с границей слияния зон LPB в рассматриваемом сечении лопаток (см. рис. 8). Далее от очага трещины развиваются в двух диаметрально противоположных направлениях: в сторону входной и выходной кромок параллельно подошве замка. В изломах нет дефектов материала.

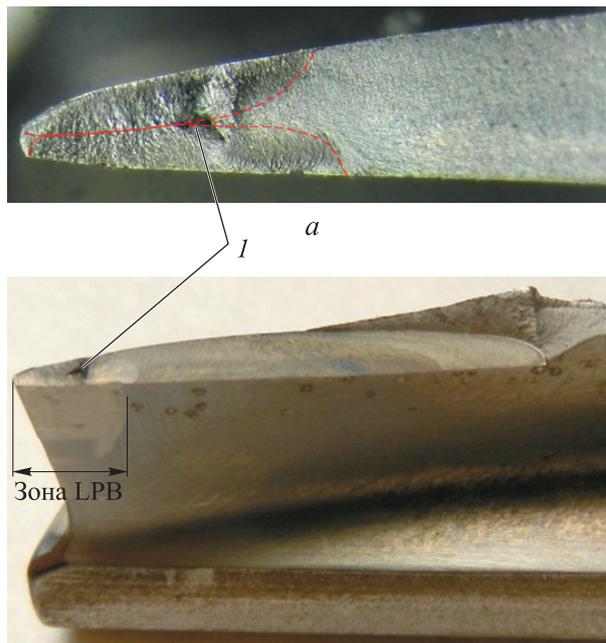


Рис. 9. Внешний вид изломов на лопатке после LSP (а) и LPB (б) без концентратора: 1 — очаг развития трещин; - - - — зона упрочнения

Очаг зарождения трещины после LSP — подповерхностный (см. рис. 9, а) — расположен на глубине примерно 600 мкм от вершины кромки. В изломах нет дефектов материала.

Анализ изломов после LPB и LSP показал, что глубина упрочненного слоя составляет 0,6...1,0 мм.

Основную роль при подслоином разрушении играют глубина упрочненного слоя и распределение ОНС в зоне перехода к неупрочненной части. Эффект упрочнения растет с увеличением глубины слоя до определенного предела, а также с увеличением глубины ОНС [28]. При указанном переходе поверхностные дефекты (микронеровность и др.) перестают влиять на возникновение трещины и шероховатость.

Выводы

1. Глубина слоя, упрочненного методами LSP и LPB, достигает 1 мм.
2. Коэффициент чувствительности к концентрации напряжений лопаток компрессора ГТД после упрочнения (0,02...0,15) меньше, чем у лопаток, изготовленных без упрочнения (0,24...0,44).
3. При упрочнении входной кромки пера лопаток разными методами эффективный ко-

ээффициент концентрации напряжений становится в 1,2–2,0 раза меньше, чем у неупрочненных лопаток.

4. Повреждение глубиной до 0,5 мм практически не снижает усталостные свойства упроч-

ненных лопаток в зоне концентрации напряжений.

5. Внедрение метода LSP позволит уменьшить количество зачинок лопаток и преждевременного съема ГТД с эксплуатации.

Литература

- [1] Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. *Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок*. Т. 2. Компрессоры. Камеры сгорания. Форсажные камеры. Турбины. Выходные устройства. Москва, Машиностроение, 2008. 366 с.
- [2] 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>
- [3] Александров И.М., Миляев К.Е., Семенов С.В. и др. Анализ возможности применения низкопластичного выглаживания для повышения надежности лопаток ГТД. *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*, 2018, № 53, с. 86–96, doi: <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2018.53.08>
- [4] Zhang Q., Ye Y., Yang Y. et al. Review of low-plasticity burnishing and its applications. *Adv. Eng. Mater.*, 2022, no. 24, no. 11, art. 2200365, doi: <https://doi.org/10.1002/adem.202200365>
- [5] Mahajan D., Tajane R. A review on ball burnishing process. *Int. J. Sci. Res. Publ.*, 2013, vol. 3, no. 4. URL: <http://www.ijsrp.org/research-paper-0413.php?rp=P161004>
- [6] Dzierwa A. Influence of ball-burnishing process on surface topography parameters and tribological properties of hardened steel. *Machines*, 2019, vol. 7, no. 1, art. 11, doi: <https://doi.org/10.3390/machines7010011>
- [7] Иванов Ю.Ф., Рыгина М.Е., Петрикова Е.А. и др. Структура и механические свойства заэвтектического силумина, облученного импульсным электронным пучком. *Вестник МАИ*, 2021, т. 28, № 2, с. 216–222, doi: <https://doi.org/10.34759/vst-2021-2-216-223>
- [8] Кочубей А.А., Вернигорю Ю.М., Демин Г.В. Физико-технологические основы упрочнения длинномерных деталей летательных аппаратов в устройствах с вращающимся электромагнитным полем. *Вестник МАИ*, 2020, т. 27, № 1, с. 201–216, doi: <https://doi.org/10.34759/vst-2020-1-201-216>
- [9] *Инструментальные технологии улучшения металлических поверхностей*. rp-ural.ru: веб-сайт. URL: https://www.rp-ural.ru/wp-content/uploads/2021/05/Ecoroll_RU.pdf (дата обращения: 13.12.2023).
- [10] *Surface treatment services*. lambdatechs.com: веб-сайт. URL: <https://www.lambdatechs.com/surface-treatment-services/> (дата обращения: 13.12.2023).
- [11] Lavrys S.M., Pohrelyuk I.M., Lukyanenko A.G. Fatigue limit of two-phase titanium alloy after surface deformation-diffusion treatment. *JOM*, 2023, vol. 75, no. 4, pp. 1251–1260, doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-022-05659-5>
- [12] Rotella G. Roller burnishing of Ti6Al4V under different cooling/lubrication conditions and tool design: effects on surface integrity. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2020, vol. 106, no. 2, pp. 431–440, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04631-z>
- [13] Velazquez-Corral E., Wagner V., Jerez-Mesa R. et al. Wear resistance and friction analysis of Ti6Al4V cylindrical ball-burnished specimens with and without vibration assistance. *The Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10919-y>
- [14] Jerez-Mesa R., Travieso-Rodríguez J.A., Landon Y. et al. Comprehensive analysis of surface integrity modification of ball-end milled Ti-6Al-4V surfaces through vibration-assisted ball burnishing. *J. Mater. Process. Technol.*, 2019, no. 267, pp. 230–240, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.12.022>
- [15] Новиков И.А., Ножницкий Ю.А., Шибаев 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
- [16] 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>
- [17] 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.
- [18] Kalainathan S., Prabhakaran S. Recent development and future perspectives of low energy laser shock peening. *Opt. Laser Technol.*, 2016, no. 81-A, pp. 137–144, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.02.007>
- [19] Jiao Y., He W., Shen X. Enhanced high cycle fatigue resistance of Ti-17 titanium alloy after multiple laser peening without coating. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2019, vol. 101, no. 5–8, pp. 1333–1343, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3006-6>
- [20] 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>
- [21] Qutaba S., Asmelash M., Saptaji K. et al. A review on peening processes and its effect on surfaces. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2022, vol. 120, no. 7–8, pp. 4233–4270, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09021-6>
- [22] Liao Y., Ye C., Cheng G.Y. A review: warm laser shock peening and related laser processing technique. *Opt. Laser Technol.*, 2016, no. 81-A, pp. 15–24, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.09.014>
- [23] Lin C., Wu H., Li Z. et al. Evaluation of oblique laser shock peening effect of FGH95 superalloy turbine disk material. *Mater. Today Commun.*, 2022, vol. 31, art. 103534, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103534>
- [24] Ляховецкий М.А., Королев Д.Д., Кожевников Г.Д. и др. Лазерное ударное упрочнение титанового сплава ВТ6 с алюминиевым абляционным покрытием. *Быстрозакаленные материалы и покрытия. Мат. XVIII Межд. науч.-тех. конф. Москва, Пробел-2000*, 2021, с. 258–263.
- [25] Chen C., Zhang X., Yan X. et al. Effect of laser shock peening on combined low- and high-cycle fatigue life of casting and forging turbine blades. *J. Iron Steel Res. Int.*, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 108–119, doi: <https://doi.org/10.1007/s42243-017-0013-z>
- [26] Зо Й.М. *Ударная обработка цветных металлов и сплавов малоомощными лазерными источниками*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. 16 с.
- [27] Ширяев А.А., Миленин А.С., Таиров Д.Ф. Влияние методов упрочнения на предел выносливости лопаток из титанового сплава. *АКТТИ-2023*, 2023, с. 229–300.
- [28] Когаев В.П., Гусенков А.П., ред. *Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени*. Москва, Машиностроение, 1993. 364 с.

References

- [1] Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A., Sandratskiy V.L. *Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok*. Т. 2. Компрессоры. Камеры сгорания. Форсажные камеры. Турбины. Выходные устройства [Fundamentals of design of aircraft engines and power plants. Vol. 2. Compressors. Combustion chambers. Afterburner chambers. Turbines. Output devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 366 p. (In Russ.).
- [2] Nepein K.G., Selivanov I.A. Improving the fatigue resistance characteristics of compressor blades made of titanium alloy. *Vestnik PNIPIU. 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.).
- [3] Aleksandrov I.M., Milyaev K.E., Semenov S.V. et al. Application of technology of low plasticity burnishing in heightening of reability of fan blades possibility analysis. *Vestnik PNIPIU. Aerokosmicheskaya tekhnika* [PNRPU Aerospace Engineering Bulletin], 2018, no. 53, pp. 86–96, doi: <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2018.53.08> (in Russ.).

- [4] Zhang Q., Ye Y., Yang Y. et al. Review of low-plasticity burnishing and its applications. *Adv. Eng. Mater.*, 2022, no. 24, no. 11, art. 2200365, doi: <https://doi.org/10.1002/adem.202200365>
- [5] Mahajan D., Tajane R. A review on ball burnishing process. *Int. J. Sci. Res. Publ.*, 2013, vol. 3, no. 4. URL: <http://www.ijsrp.org/research-paper-0413.php?rp=P161004>
- [6] Dzierwa A. Influence of ball-burnishing process on surface topography parameters and tribological properties of hardened steel. *Machines*, 2019, vol. 7, no. 1, art. 11, doi: <https://doi.org/10.3390/machines7010011>
- [7] Ivanov Yu.F., Rygina M.E., Petrikova E.A. et al. Structure and mechanical properties of hypereutectic silumin irradiated by a pulsed electron beam. *Vestnik MAI [Aerospace MAI Journal]*, 2021, vol. 28, no. 2, pp. 216–222, doi: <https://doi.org/10.34759/vst-2021-2-216-223> (in Russ.).
- [8] Kochubey A.A., Vernigorov Yu.M., Demin G.V. Physico-technological basics of aircraft long parts hardening in the devices with rotating magnetic field. *Vestnik MAI [Aerospace MAI Journal]*, 2020, vol. 27, no. 1, pp. 201–216, doi: <https://doi.org/10.34759/vst-2020-1-201-216> (in Russ.).
- [9] *Instrumentalnye tekhnologii uluchsheniya metallicheskih poverkhnostey [Tool technologies for improvement of metal surfaces]*. rp-ural.ru: website. URL: https://www.rp-ural.ru/wp-content/uploads/2021/05/Ecoroll_RU.pdf (accessed: 13.12.2023). (In Russ.).
- [10] *Surface treatment services*. lambdatechs.com: website. URL: <https://www.lambdatechs.com/surface-treatment-services/> (accessed: 13.12.2023)
- [11] Lavrys S.M., Pohrelyuk I.M., Lukyanenko A.G. Fatigue limit of two-phase titanium alloy after surface deformation-diffusion treatment. *JOM*, 2023, vol. 75, no. 4, pp. 1251–1260, doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-022-05659-5>
- [12] Rotella G. Roller burnishing of Ti6Al4V under different cooling/lubrication conditions and tool design: effects on surface integrity. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2020, vol. 106, no. 2, pp. 431–440, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04631-z>
- [13] Velazquez-Corral E., Wagner V., Jerez-Mesa R. et al. Wear resistance and friction analysis of Ti6Al4V cylindrical ball-burnished specimens with and without vibration assistance. *The Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10919-y>
- [14] Jerez-Mesa R., Travieso-Rodríguez J.A., Landon Y. et al. Comprehensive analysis of surface integrity modification of ball-end milled Ti-6Al-4V surfaces through vibration-assisted ball burnishing. *J. Mater. Process. Technol.*, 2019, no. 267, pp. 230–240, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.12.022>
- [15] Novikov I.A., Nozhnitskiy Yu.A., Shibaev S.A. International experience in research and application of the technological process of laser shock peening 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.).
- [16] 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>)
- [17] 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 of PNRPU. Mechanical engineering, materials science]*, 2023, no. 4, pp. 109–117. (In Russ.).
- [18] Kalainathan S., Prabhakaran S. Recent development and future perspectives of low energy laser shock peening. *Opt. Laser Technol.*, 2016, no. 81-A, pp. 137–144, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.02.007>
- [19] Jiao Y., He W., Shen X. Enhanced high cycle fatigue resistance of Ti-17 titanium alloy after multiple laser peening without coating. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2019, vol. 101, no. 5–8, pp. 1333–1343, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3006-6>
- [20] 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>

- [21] Qutaba S., Asmelash M., Saptaji K. et al. A review on peening processes and its effect on surfaces. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2022, vol. 120, no. 7–8, pp. 4233–4270, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09021-6>
- [22] Liao Y., Ye C., Cheng G.Y. A review: warm laser shock peening and related laser processing technique. *Opt. Laser Technol.*, 2016, no. 81-A, pp. 15–24, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.09.014>
- [23] Lin C., Wu H., Li Z. et al. Evaluation of oblique laser shock peening effect of FGH95 superalloy turbine disk material. *Mater. Today Commun.*, 2022, vol. 31, art. 103534, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103534>
- [24] Lyakhovetskiy M.A., Korolev D.D., Kozhevnikov G.D. et al. [Laser shock hardening of titanium alloy BT6 with aluminium ablative coating]. *Bystrozakalennyye materialy i pokrytiya. Mat. XVIII Mezhd. nauch.-tekh. konf. [Rapidly hardened materials and coatings. Proc. XVIII Int. Sci.-Tech. Conf.]*. Moscow, Probel-2000 Publ., 2021, pp. 258–263. (In Russ.).
- [25] Chen C., Zhang X., Yan X. et al. Effect of laser shock peening on combined low- and high-cycle fatigue life of casting and forging turbine blades. *J. Iron Steel Res. Int.*, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 108–119, doi: <https://doi.org/10.1007/s42243-017-0013-z>
- [26] Zo Y.M. *Udarnaya obrabotka tsvetnykh metallov i splavov malomoshchnymi lazernymi istochnikami* [Shock treatment of non-ferrous metals and alloys by low-power laser sources]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2020. 16 p. (In Russ.).
- [27] Shiryaev A.A., Milenin A.S., Tairov D.F. [Influence of hardening methods on the endurance limit on blades of titanium alloy]. *AKTTI-2023*, 2023, pp. 229–300. (In Russ.).
- [28] Kogaev V.P., Gusenkov A.P., eds. *Raschety na prochnost pri napryazheniyakh, peremennykh vo vremeni* [Strength calculations at stresses variable in time]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. 364 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 18.01.2024

Информация об авторах

ШИРЯЕВ Алексей Александрович — инженер КО-2993. АО «ОДК-Авиадвигатель» (614990, Пермь, Российская Федерация, Комсомольский пр-т, д. 93, e-mail: shiryaev-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 Alexey Aleksandrovich — Engineer, Department КО-2993. JSC UEC-Aviadvigatel (614990, Perm, Russian Federation, Komsomolskiy Ave., Bldg. 93, e-mail: shiryaev-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).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ширяев А.А., Миленин А.С. Влияние методов упрочнения на усталостную прочность лопаток компрессора с концентраторами напряжений. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 9, с. 72–81.

Please cite this article in English as:

Shiryaev A.A., Milenin A.S. Hardening methods influence on fatigue strength of the compressor blades with stress concentrators. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 9, pp. 72–81.