

УДК 621.787, 539.372

Влияние параметров лазерной ударной обработки на деформацию кромки лопатки компрессора из титанового сплава

А.А. Ширяев

АО «ОДК-Авиадвигатель»

Influence of laser shock peening parameters on the distribution of residual stresses in the edge of a titanium alloy compressor blade

A.A. Shiryayev

UEC-Aviadvigatel JSC

Исследовано влияние параметров лазерного излучения на геометрические параметры кромки пера лопатки компрессора из титанового сплава при математическом моделировании процесса лазерной ударной обработки. Обработка выполнена лазерным лучом с квадратным пятном длиной 1...3 мм без перекрытия пятен за один проход. Оценено влияние размера пятна на время обработки. Моделирование включало в себя два этапа. На первом проведено моделирование распространения упругопластических волн на основе определяющего соотношения Джонсона — Кука, на втором — статический расчет распределения остаточных напряжений. Анализ количества лазерных пятен, необходимых для обработки зоны диаметром 10×5 мм, показал, что при длине пятна 2...3 мм время обработки существенно меньше, чем при его длине 1 мм. Применение лазерной ударной обработки с обеих сторон приводит к удлинению кромки пера лопатки. С повышением плотности мощности излучения кромка становится длиннее, а коэффициент перекрытия пятен изменяет угол наклона кривой удлинения. Двухопорное закрепление лопатки за замок и среднюю зону обеспечивают геометрические отклонения после лазерной ударной обработки в пределах допуска на размер. Также можно выполнить лопатку с отклонением от заданной длины, чтобы после деформации от обработки они стали соответствовать требованиям конструкторской документации.

EDN: PCLOSN, <https://elibrary/pclosn>

Ключевые слова: лазерная ударная обработка, титановый сплав, деформация кромки лопатки, двухопорное закрепление, параметры обработки

The paper analyzes the influence of laser radiation parameters on alteration in the geometric parameters of the compressor blade feather edge made of titanium alloy using mathematical simulation of the laser shock peening process. The peening was performed by a laser beam with a square spot of side of 1...3 mm without overlapping the spots in a singular pass. Influence of the spot size on the peening time was assessed. Simulation included two stages. At the first stage, propagation of the elastic-plastic waves was simulated based on the Johnson-Cook constitutive relation. At the second stage, static computation of the residual stresses distribution was performed. Analysis of the number of laser spots required to peen an area with the diameter of 10×5 mm showed that with a spot size of 2...3 mm, the treatment time was significantly shorter than with the size of 1 mm. Using

the laser shock peening on both sides led to elongation of the blade feather edge. With an increase in the radiation power density, the edge elongated, and the spot overlap coefficient changed the elongation curve slope. Double-support blade fastening by the lock and the middle zone ensured geometric deviations after the laser shock peening within the size tolerance. Besides, the blade could be manufactured with deviation from the geometric parameters, so that after deformation from peening, they should satisfy requirements of the design documentation.

EDN: PCLOSН, <https://elibrary/pclosn>

Keywords: laser shock peening, titanium alloy, blade edge deformation, double-support fastening, machining parameters

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 повреждениям от попадания посторонних предметов (льда, песка, птиц, мусора на взлетно-посадочной полосе и др.) [1].

Попадание посторонних предметов в проточную часть ГТД приводит к таким повреждениям лопаток, как забоина, 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).

Такие повреждения приводят к преждевременному съему ГТД с эксплуатации и требуют проведения ремонта/зачистки повреждений на лопатках. Ввиду того, что зачистку лопаток выполняют только на базовых аэродромах, эксплуатация ГТД становится более дорогостоящей.

Для повышения стойкости лопаток к повреждениям применяют различные методы поверхностного упрочнения [2, 3], в том числе лазерную ударную обработку (ЛУО) [4, 5].

ЛУО можно подразделить на четыре этапа. На первом происходит импульсное лазерное воздействие на поверхность детали, погруженной в воду (слой около 1 мм), и удаление тонкого слоя за один лазерный импульс, что позволяет пренебречь испарением материала при моделировании ЛУО. На втором этапе вследствие поглощения энергии лазерного воздействия создается плазма высокого давления. Благодаря ее расширению на третьем этапе генерируется механический импульс высокого давления,

распространяющийся вглубь материала в виде упругопластической волны. На четвертом этапе из-за возникновения неоднородной пластической деформации формируются остаточные напряжения (ОН).

В работах [6–8] показано, что по глубине распространения (далее глубина) ОН сжатия после ЛУО (более 0,3 мм) превосходит серийно применяемые методы упрочнения — дробеструйную и гидродробеструйную обработки.

Для подбора параметров лазерного излучения при ЛУО различных материалов широко применяют численное моделирование, используя такие программные пакеты, как Abaqus, ANSYS LS-DYNA и COMSOL Multiphysics.

Работы по моделированию процесса ЛУО можно подразделить на три группы: моделирование единичного удара, многократную обработку плоских образцов и обработку модели лопатки [9–13].

Моделированию ЛУО лопатки компрессора из ТС4 с одной и двух сторон посвящена работа [9]. Показано, что при увеличении размера лазерного пятна (далее пятно) до 5 мм ОН сжатия повышаются до –346 МПа, а распределение ОН по глубине остается неизменным (достигая 0,65 мм). Возрастание продолжительности лазерного импульса приводит к росту уровня ОН и глубины ОН сжатия до 1 мм.

В статье [10] при заданных параметрах ЛУО — диаметре пятна 3 мм, продолжительности лазерного импульса 20 нс, коэффициенте перекрытия пятен 30 % и энергии лазера 2, 3 и 5 Дж — ОН сжатия достигли –450 МПа, а деформация кромки лопатки составила около 4 мкм.

В работе [11] для прогнозирования уровня и глубины ОН предложено использовать нейросеть вместо моделирования методом конечных элементов процесса ЛУО. В качестве экспериментального материала выступал титановый сплав ТС4.

Использование нейросети требует ее предварительного обучения на как минимум тысяче данных, варьирование параметрами при ЛУО не набирает даже минимально необходимого количества опытов.

В работе [12] оценено влияние параметров ЛУО на измельчение зерна и распределение ОН в поверхностном слое серединной части лопатки и плоского образца при одно- и многократном (до 5) проходах лазера. Обработка проведена при плотности мощности 7 ГВт/см² и диаметре пятна 2 мм с варьированием коэффициента перекрытия пятен. Увеличение коэффициента перекрытия привело к измельчению зерна, а уровень ОН сжатия изменился незначительно.

В статье [13] приведены результаты ЛУО ограниченной зоны лопатки из (α+β)-сплава ТС17 шириной 40 мм. Выполнено сравнение последовательной и одновременной двусторонних ЛУО. Одновременная ЛУО показала более равномерное распределение ОН в серединной зоне лопатки, чем односторонняя. Сравнение расчетных данных с экспериментальными, полученными методом рентгеновской дифрактометрии, показало, что погрешность ОН на поверхности не превышает 7...8 %.

Анализ литературы выявил малое количество публикаций в открытых источниках по ЛУО лопатки и, особенно по проблеме обеспечения требуемых геометрических параметров после ЛУО. Отсутствует информация по распределению ОН в сечении кромки лопатки. Помимо обеспечения необходимых геометрических размеров сечения лопатки после ЛУО к упрочнению предъявляют следующие требования: достижение глубины ОН сжатия до 1 мм; деформация детали не должна выходить за пределы допуска на размер; отсутствие микротрещин на поверхности, так как титановые сплавы восприимчивы к концентраторам напряжений; увеличение предела выносливости лопаток, в том числе с забоинами.

Математическая модель ЛУО. Моделирование ЛУО не включало в себя этапы испарения материала с поверхности и формирования плазмы высокого давления. Влияние лазерного импульса учитывали путем задания на поверхности образца функции механического давления, зависящей от времени.

Для вычисления ОН, вызванных ЛУО, применяли модель Джонсона — Кука. В предполо-

жении отсутствия температурного воздействия при ЛУО [14, 15] эквивалентное напряжение

$$\sigma_{eq} = \left[A + B(\epsilon_{eq}^{pl})^n \right] \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}_{eq}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right),$$

где A — квазистатический предел текучести; B — коэффициент упрочнения; ϵ_{eq}^{pl} — эквивалентная пластическая деформация; n — показатель деформационного упрочнения; C — параметр, определяющий скоростную чувствительность; $\dot{\epsilon}_{eq}^{pl}$ — эквивалентная скорость пластической деформации; $\dot{\epsilon}_0$ — контрольная скорость деформации.

Поведение упругого материал, принятого изотропным, описывали законом Гука с двумя параметрами — модулем упругости и коэффициентом Пуассона.

Модель материала Джонсона — Кука для титанового сплава ВТ6 имела следующие параметры [16, 17]: плотность $\rho = 4424$ кг/м³; модуль упругости $E = 106,7$ ГПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,314$; квазистатический предел текучести $A = 900$ МПа; коэффициент упрочнения $B = 509,75$ МПа; показатель деформационного упрочнения $n = 0,506$; параметр, определяющий скоростную чувствительность $C = 0,014$ [13]; контрольная скорость деформации $\dot{\epsilon}_0 = 0,001$ с⁻¹.

Моделирование процесса ЛУО включало в себя два этапа: приложение давления (явный анализ) и экспорт результата, полученного на первом этапе, в неявный анализ для расчета упругой разгрузки.

Цель работы — оценить влияние параметров ЛУО на удлинение кромки пера лопатки и геометрические параметры при различных условиях закрепления, а также определить параметры ЛУО, приводящие к минимальному изменению геометрических параметров кромки пера и лопатки в целом.

Анализ изменения геометрических размеров сечения кромки пера, возникающих в результате ЛУО при различных параметрах лазерного излучения. Для исследования влияния режимов ЛУО на геометрические размеры сечения проводили моделирование кромки лопатки компрессора из титанового сплава.

Геометрические размеры кромки лопатки и граничные условия указаны на рис. 1, а и б, где 15, 30, 40 и 50 — расстояния от зоны обработки до точки начала обработки. ЛУО выполняли на верхней грани кромки, не включая радиус

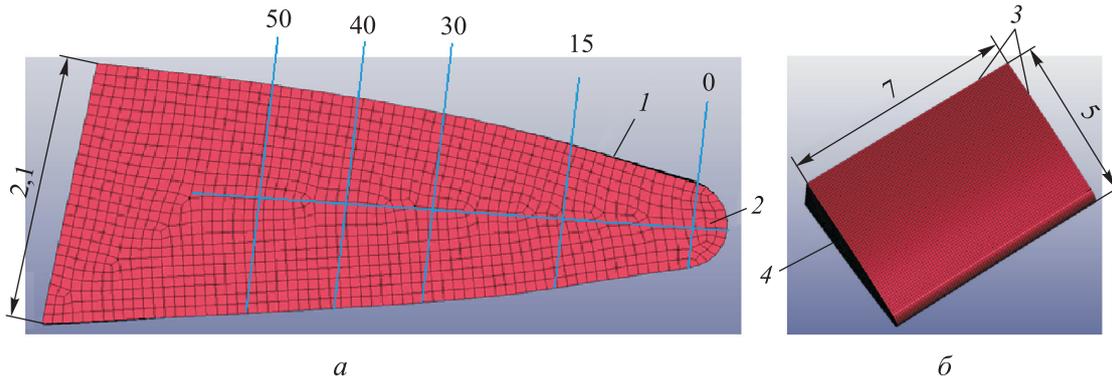


Рис. 1. Модели кромки (а) и ее габаритных размеров с граничными условиями (б): 1 — зона обработки; 2 — середина кромки; 3 и 4 — запрет отражений и перемещений

последней. Точка начала ЛУО обозначена линией 0. ЛУО проводили при различных стратегиях обработки, плотности мощности излучения и длине стороны пятна. В качестве формы пятна выбран квадрат, так как распределение энергии в зоне воздействия излучения близко к однородному.

Влияние продолжительности лазерного импульса t на профиль давления излучения, прикладываемого к пятну, показано на рис. 2, где p и p_{\max} — давление излучения и его максимальное значение.

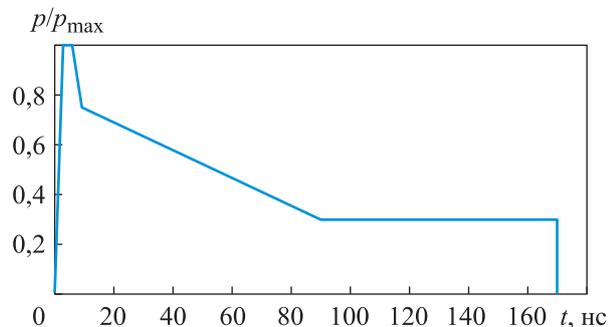


Рис. 2. Влияние продолжительности лазерного импульса t на профиль давления излучения, прикладываемого к пятну

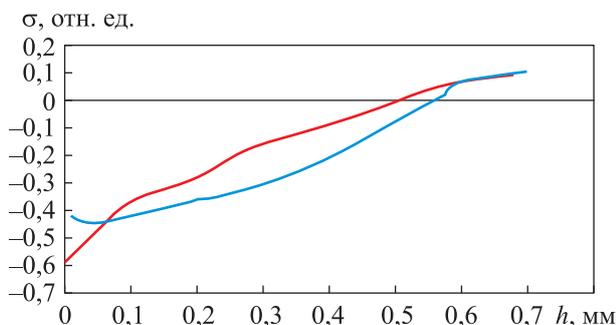


Рис. 3. Распределение ОН σ по глубине ОН h , полученные путем эксперимента (—) и расчета (—)

ЛУО выполняли за один проход лазера без перекрытия пятен, что обеспечивало наименьшее время обработки. Для дискретизации расчетной области использовали восьмиузловые конечные элементы, размер стороны которых составлял 0,1 мм. Результаты расчета хорошо согласованы с полученными ранее экспериментальными данными для плоских образцов (рис. 3).

Оценивали влияние плотности мощности излучения и длины пятна на удлинение и деформацию кромки пера лопатки, а также требуемое время ЛУО для обработки элементарного участка кромки пера лопатки, высота которого составляла 10 мм, а ширина кромки — 5 мм, в зависимости от формы и размера пятна.

Исследование влияния длины пятна на время ЛУО. Определяли требуемое количество лазерных импульсов $N_{\text{и}}$ в зависимости от формы, размера пятна лазера и коэффициента перекрытия η (рис. 4). Это необходимо для ориентировочной оценки времени обработки на одну

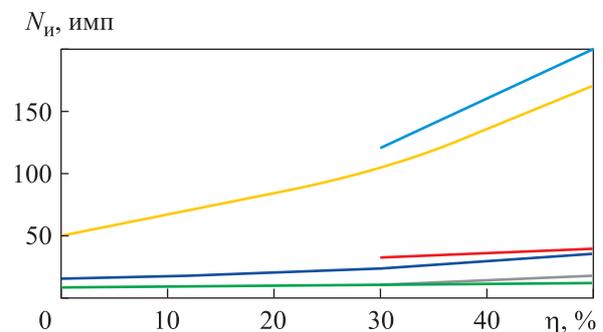


Рис. 4. Зависимости количества лазерных импульсов $N_{\text{и}}$, необходимых для обработки зоны размером 10×5 мм, от коэффициента перекрытия пятен η при разных форме и длине пятна лазера: — и — — круг и квадрат размером 1 мм; — и — — круг и квадрат размером 2 мм; — и — — круг и квадрат размером 3 мм

лопатку исходя из ее габаритных размеров при частоте 5 Гц. Оценка времени ЛУО выполнена на элементарном участке кромки пера лопатки размером 10×5 мм с последующим пересчетом исходя из габаритных размеров лопатки.

Так как параметры ЛУО подбирали исходя из требуемой эпюры ОН, можно применять весь перечень форм и размеров пятен.

Исследование влияния параметров ЛУО на удлинение кромки пера лопатки. Применение ЛУО с обеих сторон приводит к удлинению кромки в зависимости от параметров обработки. С повышением плотности мощности излучения кромка становится длиннее, а коэффициент перекрытия пятен изменяет угол наклона кривой удлинения (рис. 5). Следовательно, необходимо оставлять припуск под ЛУО.

Исследование влияния параметров ЛУО на деформацию кромки пера лопатки. Для дискретизации расчетной области использовали восьмиузловые конечные элементы, размер стороны которых составлял 0,25 мм. Моделирование ЛУО проводили вдоль всей кромки пера с обеих сторон, включая радиус перехода между замком и пером лопатки, при длине пятна 3 мм без перекрытия пятен.

Две схемы закрепления лопатки при ЛУО (выделены белым цветом) — за замок (одноопорная) и за замок и область средней линии (двухопорная) показаны на рис. 6. После ЛУО выполняли контроль деформации вдоль всей кромки пера в нескольких сечениях с шагом 10 мм. Результаты контроля приведены на рис. 7, где l_3 — расстояние до замка.

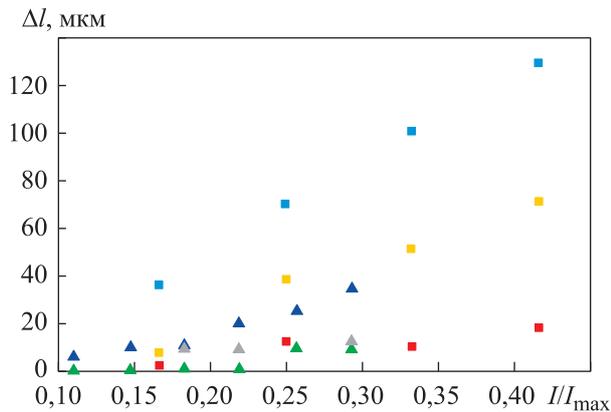


Рис. 5. Зависимости удлинения кромки лопатки Δl от плотности мощности излучения I/I_{max} при различных значениях длины пятна и коэффициента перекрытия пятен η :
 ■ — $a = 2$ мм, $\eta = 0$; □ — $a = 2$ мм, $\eta = 30\%$;
 ▲ — $a = 2$ мм, $\eta = 50\%$; △ — $a = 3$ мм, $\eta = 0$;
 ▲ — $a = 3$ мм, $\eta = 30\%$; △ — $a = 3$ мм, $\eta = 50\%$

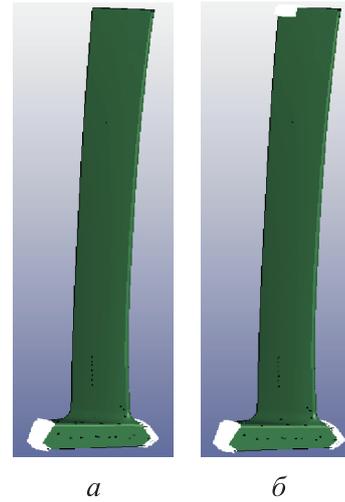


Рис. 6. Одно- (а) и двухопорная (б) схемы закрепления лопатки

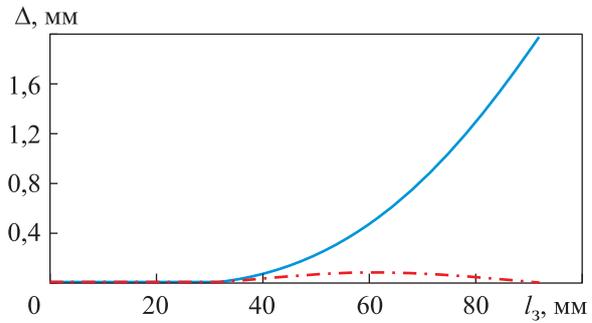


Рис. 7. Зависимости отклонения длины лопатки Δ после ЛУО от расстояния до замка l_3 при одно- (—) и двухопорном (---) закреплении лопатки

Двухопорное закрепление лопатки обеспечивает геометрические отклонения в рамках допуска. Также можно выполнить лопатку с отклонением от заданной длины, чтобы после деформации от ЛУО они стали соответствовать требованиям конструкторской документации.

Выводы

1. Выполнена оценка требуемого времени ЛУО на элементарном участке кромки пера лопатки размером 10×5 мм.
2. Применение ЛУО с обеих сторон приводит к удлинению кромки в зависимости от параметров обработки. Коэффициент перекрытия пятен изменяет угол наклона кривой удлинения.
3. Двухопорное закрепление лопатки обеспечивает геометрические отклонения в рамках допуска. Также можно выполнить лопатку с отклонением от заданной длины, чтобы после деформации от ЛУО они стали соответствовать требованиям конструкторской документации.

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] Гидродробеструйный метод упрочнения деталей ГТД основанный на пластическом деформировании поверхностного слоя. *gidroabraziv.com: веб-сайт*. URL: <https://www.gidroabraziv.com/technology/gidrodrobestrujnyj-metod-uprochneniya-detalej-gtd/> (дата обращения: 15.06.2024).
- [3] Han K., Zhang D., Yao C. et al. Studies and optimization of surface roughness and residual stress in ball burnishing of Ti60 alloy. *J. of Materi. Eng. and Perform.*, 2022, vol. 31, no. 5, pp. 3457–3470, doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06457-x>
- [4] Новиков И.А., Ножницкий Ю.А., Шibaев 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
- [5] Nie X., He W., Cao Z. et al. Experimental study and fatigue life prediction on high cycle fatigue performance of laser-peened TC4 titanium alloy. *Mater. Sci. Eng. A*, 2021, vol. 822, art. 141658, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141658>
- [6] 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.
- [7] Mironov S., Ozerov M., Kalinenko A. et al. On the relationship between microstructure and residual stress in laser-shock-peened Ti-6Al-4V. *J. Alloys Compd.*, 2022, vol. 900, art. 163383, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163383>
- [8] 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.
- [9] Fang Y.W., Li Y.H., He W.F. et al. Effects of laser shock processing with different parameters and ways on residual stresses fields of a TC4 alloy blade. *Mater. Sci. Eng. A*, 2013, no. 559, pp. 683–692, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.09.009>
- [10] Ma S., Ding X., Yang Z. et al. Numerical simulation of TC17 titanium alloy thin blade strengthened by laser shock processing. In: APISAT 2021. *Springer*, 2022, vol. 1, pp. 949–961, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-19-2689-1_73
- [11] Ding X., Li H., Jiang Z. et al. Prediction of surface residual stresses after laser shock processing on tc4 titanium alloy using different neural network agent models. *Coatings*, 2023, vol. 13, no. 11, art. 1889, doi: <https://doi.org/10.3390/coatings13111889>
- [12] Wang C., Li K., Hu X. et al. Numerical study on laser shock peening of TC4 titanium alloy based on the plate and blade model. *Opt. Laser Technol.*, 2021, vol. 142, art. 107163, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107163>
- [13] Fang Y. Strengthening effects of the laser light impact on a TC17 blade in view of simulations and experiments. *J. Russ. Laser Res.*, 2021, vol. 42, no. 3, pp. 328–339, doi: <https://doi.org/10.1007/s10946-021-09966-1>
- [14] Langer K., Spradlin T.J., Fitzpatrick M.E. Finite element analysis of laser peening of thin aluminum structures. *Metals*, 2020, vol. 10, no. 1, art. 93, doi: <https://doi.org/10.3390/met10010093>
- [15] Bhamare S., Ramakrishnan G., Mannava S.R. et al. Simulation-based optimization of laser shock peening process for improved bending fatigue life of Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo alloy. *Surf. Coat. Technol.*, 2013, no. 232, pp. 464–474, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.06.003>
- [16] Бузюкин А.Е., Гладкий И.Л., Краус Е.И. Определение параметров модели Джонсона-Кука для описания процессов деформирования и разрушения титановых сплавов. *Прикладная механика и техническая физика*, 2015, т. 56, № 2, с. 188–195, doi: <https://doi.org/10.15372/PMTF20150219>

- [17] Hammer J.T. *Plastic deformation and ductile fracture of Ti-6Al-4V under various loading conditions*. Master thesis. Columbus, Ohio State Univ., 2012. 243 p.

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] *Gidrodobestruiyuyemyy metod uprochneniya detaley GTD osnovannyiy na plasticheskom deformirovaniy poverkhnostnogo sloya* [Hydrodroblast method of GTD parts hardening based on plastic deformation of the surface layer]. *gidroabraziv.com: website*. URL: <https://www.gidroabraziv.com/technology/gidrodobestruiyuyemyy-metod-uprochneniya-detaley-gtd/> (accessed: 15.06.2024). (In Russ.).
- [3] Han K., Zhang D., Yao C. et al. Studies and optimization of surface roughness and residual stress in ball burnishing of Ti60 alloy. *J. of Materi. Eng. and Perform.*, 2022, vol. 31, no. 5, pp. 3457–3470, doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06457-x>
- [4] Novikov I.A., Nozhnitskiy Yu.A., Shibaev S.A. International experience in research and application of the technological process of laser shockpeening of metals (review). *Aviatsionnye dvigateli* [Aviation Engines], 2022, no. 2, pp. 59–82, doi: https://doi.org/10.54349/26586061_2022_1_59 (in Russ.).
- [5] Nie X., He W., Cao Z. et al. Experimental study and fatigue life prediction on high cycle fatigue performance of laser-peened TC4 titanium alloy. *Mater. Sci. Eng. A*, 2021, vol. 822, art. 141658, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141658>
- [6] 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.).
- [7] Mironov S., Ozerov M., Kalinenko A. et al. On the relationship between microstructure and residual stress in laser-shock-peened Ti-6Al-4V. *J. Alloys Compd.*, 2022, vol. 900, art. 163383, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163383>
- [8] Shiryaev A.A., Gabov I.G., Milenin A.S. Influence of laser impact hardening on the parameters of the surface layer of turbine engine compressor blades made of titanium alloy. *Vestnik PNIPU. Mashinostroenie, materialovedenie* [Bulletin PNRPU. Mechanical Engineering, Materials Science], 2024, no. 1, pp. 66–73. (In Russ.).
- [9] Fang Y.W., Li Y.H., He W.F. et al. Effects of laser shock processing with different parameters and ways on residual stresses fields of a TC4 alloy blade. *Mater. Sci. Eng. A*, 2013, no. 559, pp. 683–692, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.09.009>
- [10] Ma S., Ding X., Yang Z. et al. Numerical simulation of TC17 titanium alloy thin blade strengthened by laser shock processing. In: APISAT 2021. *Springer*, 2022, vol. 1, pp. 949–961, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-19-2689-1_73
- [11] Ding X., Li H., Jiang Z. et al. Prediction of surface residual stresses after laser shock processing on tc4 titanium alloy using different neural network agent models. *Coatings*, 2023, vol. 13, no. 11, art. 1889, doi: <https://doi.org/10.3390/coatings13111889>
- [12] Wang S., Li K., Hu X. et al. Numerical study on laser shock peening of TC4 titanium alloy based on the plate and blade model. *Opt. Laser Technol.*, 2021, vol. 142, art. 107163, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107163>
- [13] Fang Y. Strengthening effects of the laser light impact on a TC17 blade in view of simulations and experiments. *J. Russ. Laser Res.*, 2021, vol. 42, no. 3, pp. 328–339, doi: <https://doi.org/10.1007/s10946-021-09966-1>
- [14] Langer K., Spradlin T.J., Fitzpatrick M.E. Finite element analysis of laser peening of thin aluminum structures. *Metals*, 2020, vol. 10, no. 1, art. 93, doi: <https://doi.org/10.3390/met10010093>
- [15] Bhamare S., Ramakrishnan G., Mannava S.R. et al. Simulation-based optimization of laser shock peening process for improved bending fatigue life of Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo alloy. *Surf. Coat. Technol.*, 2013, no. 232, pp. 464–474, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.06.003>

- [16] Buzyukin A.E., Gladkiy I.L., Kraus E.I. Determination of parameters of the Johnson-Cook model for the description of deformation and fracture of titanium alloys. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2015, vol. 56, no. 2, pp. 188–195, doi: <https://doi.org/10.15372/PMTF20150219> (in Russ.). (Eng. version: *J. Appl. Mech. Tech. Phy.*, 2015, vol. 56, no. 2, pp. 330–336, doi: <https://doi.org/10.1134/S0021894415020194>)
- [17] Hammer J.T. *Plastic deformation and ductile fracture of Ti-6Al-4V under various loading conditions*. Master thesis. Columbus, Ohio State Univ., 2012. 243 p.

Статья поступила в редакцию 03. 09.2024

Информация об авторе

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).

Information about the author

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

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ширяев А.А. Влияние параметров лазерной ударной обработки на деформацию кромки лопатки компрессора из титанового сплава. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 7, с. 37–44.

Please cite this article in English as:

Shiryayev A.A. Influence of laser shock peening parameters on the distribution of residual stresses in the edge of a titanium alloy compressor blade. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 7, pp. 37–44.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебное пособие Д.В. Виноградова «Формообразование при лезвийной обработке»

Показано место обработки резанием в общей структуре технологических процессов, раскрыты основные понятия теории резания, кратко описаны основные виды лезвийной обработки, раскрыты их особенности, показаны способы формообразования, применяемые при резании, преимущества и недостатки каждого из них. Изложен алгоритм построения геометрических параметров лезвий режущих инструментов, приведены примеры определения углов лезвий некоторых инструментов. Дано введение в кинематику резания: описаны системы координат, используемые при проектировании и изготовлении режущих инструментов, а также погрешности, возникающие при замене одной системы координат на другую.

Для студентов, изучающих дисциплину «Основы компьютерного проектирования», входящую в программу подготовки по специальности 15.05.01 «Проектирование технологических машин и комплексов». Может быть полезно при изучении курсов «Основы теории резания», «Основы проектирования режущих инструментов».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>