

УДК 621.787, 539.372

Влияние стратегии обработки на распределение остаточных напряжений сжатия в кромке пера лопатки из титанового сплава

А.А. Ширяев, А.С. Миленин

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, A.S. Milenin

UEC-Aviadvigatel JSC

Исследовано влияние стратегии лазерной ударной обработки на распределение остаточных напряжений сжатия в кромке пера лопатки, изготовленной из титанового сплава. Обработка выполнена лазерным лучом без перекрытия пятен за один проход с обеих сторон кромки. Рассмотрены последовательная и одновременная обработка, в том числе при различной плотности мощности излучения и заданном коэффициенте перекрытия пятен лазера. Моделирование включало в себя два этапа: моделирование распространения упругопластических волн на основе определяющего соотношения Джонсона — Кука и статический расчет распределения остаточных напряжений. Предложен алгоритм определения оптимальных технологических параметров лазерной ударной обработки лопатки из титанового сплава. Показано, что одновременная двусторонняя обработка лопатки обеспечивает более равномерное распределение остаточных напряжений сжатия в кромке пера лопатки за один проход. Изменение размера пятна лазера приводит к изменению зоны высоких остаточных напряжений сжатия, которых следует избегать, так как они являются потенциальным очагом зарождения трещин. Увеличение энергии импульса лазерного излучения вызывает наведение остаточных напряжений растяжения в радиусе кромки пера лопатки при длине пятна 2 мм. Определен допустимый диапазон плотности мощности излучения для обеспечения остаточных напряжений сжатия в кромке пера лопатки.

EDN: UNCSOO, <https://elibrary/uncsoo>

Ключевые слова: лазерная ударная обработка, титановый сплав, остаточные напряжения, кромка лопатки, стратегия обработки

The paper studies influence of the laser shock peening strategy on the residual compressive stress distribution in the titanium alloy compressor blade airfoil edge. Laser shock peening is performed by a laser beam without spot overlap in a single pass on both sides of the edge. The paper considers sequential and simultaneous laser shock peening at different radiation power densities and laser spot overlap coefficients. Simulation includes two stages: simulating the elastic-plastic wave propagation based on the Johnson-Cook constitutive relation and static computation of the residual stress distribution. The paper proposes an algorithm for developing recommendations for assigning the technological parameters in the laser shock peening of a titanium alloy blade. It shows that simultaneous two-sided laser shock peening of a blade provides a more uniform distribution of the residual compressive stresses

over the blade edge cross-section in a single pass. The laser spot size changes the area of the high residual compressive stresses, which should be avoided since they are a potential source of the crack initiation. Increasing the laser pulse energy causes induction of the residual tensile stresses in the blade airfoil edge radius with a spot side size of 2 mm. The paper determines a permissible range of the radiation power density for providing the residual compressive stresses in the blade airfoil edge.

EDN: UNCSOO, <https://elibrary/uncsoo>

Keywords: laser shock peening, titanium alloy, residual stresses, blade edge, machining strategy

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

При попадании посторонних предметов в проточную часть ГТД возникают различные повреждения лопаток: забоины, отгибы и вмятины. Согласно статистическим данным, наиболее часто повреждаются входные кромки рабочих лопаток и лопаток первых ступеней, что выражается в появлении забоин по их кромкам, перу и антивибрационным полкам (при наличии), которые нелинейно распределяются по длине тракта (ступеням).

Указанные повреждения приводят к преждевременному съему ГТД с эксплуатации и требуют проведения ремонта/зачистки поврежденных на лопатках. Так как зачистку лопаток выполняют только на базовых аэродромах, эксплуатация ГТД становится более дорогостоящей.

Чтобы повысить стойкость 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. На третьем этапе благодаря расширению плазмы генерируется механический импульс высокого дав-

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

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

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.

Моделирование процесса ЛУО включает в себя три этапа: моделирование единичного удара, многократную обработку плоских образцов и обработку модели лопатки [9–13].

При моделировании ЛУО лопатки компрессора из титанового сплава ТС4 с одной и двух сторон [9] выявлено, что с увеличением размера лазерного пятна (далее пятно) до 5 мм ОН сжатия повышаются до –346 МПа, а распределение ОН по глубине остается неизменным (до 0,65 мм). Возрастание продолжительности лазерного импульса приводит к росту уровня ОН, а также глубины ОН сжатия до 1 мм.

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

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

Однако для предварительного обучения нейросети требуется как минимум тысяча дан-

ных, а варьирование параметрами при ЛУО не набирает даже минимально необходимого количества опытов.

Также оценено влияние параметров ЛУО на измельчение зерна и распределение ОН в поверхностном слое срединной части лопатки и плоского образца при одно- и многократном (до 5) проходах лазера [12]. Обработка проведена при плотности мощности излучения 7 ГВт/см^2 и диаметре пятна 2 мм для различных значений коэффициента перекрытия пятен. Показано, что с увеличением коэффициента перекрытия пятен зерно становится мельче, а уровень ОН сжатия изменяется незначительно.

В работе [13] приведены результаты ЛУО ограниченной зоны лопатки из $(\alpha+\beta)$ -сплава ТС17 шириной 40 мм. Выполнено сравнение последовательной и одновременной ЛУО лопатки с двух сторон. Одновременная ЛУО показала более равномерное распределение ОН в срединной 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 показал отсутствие информации о распределении ОН в сечении кромки лопатки при ЛУО. Так как повреждение от попадания посторонних предметов получает в первую очередь кромка пера лопатки компрессора ГТД, необходимо разработать модель ее ЛУО для подбора режимов упрочнения, обеспечивающих заданный уровень ОН сжатия по сечению кромки лопатки. Применение ЛУО позволит увеличить усталостную долговечность детали, в том числе стойкость к повреждениям при попадании посторонних предметов в проточную часть ГТД.

Цель работы — оценка влияния стратегии ЛУО кромок пера лопатки компрессора (последовательной и одновременной с обеих сторон), плотности мощности излучения и размера пятна на распределение ОН сжатия.

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 предположении отсутствия температурного воздействия при ЛУО [14, 15] эквивалентное напряжение имеет вид

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

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

Поведение упругого материала, принятого изотропным, описывали законом Гука с двумя параметрами — модулем упругости и коэффициентом Пуассона. Параметры модели Джонсона — Кука, определенные в работах [16, 17], приведены в таблице.

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.

Параметры модели Джонсона — Кука для титанового сплава ВТ6

Параметр	Значение
Плотность ρ , кг/м ³	4424
Модуль упругости E , ГПа	106,7
Коэффициент Пуассона ν	0,314
Квазистатический предел текучести A , МПа	900
Коэффициент упрочнения B , МПа	509,75
Показатель деформационного упрочнения n	0,506
Скоростная чувствительность C	0,014
Контрольная скорость деформации $\dot{\epsilon}_0$, с ⁻¹	0,001

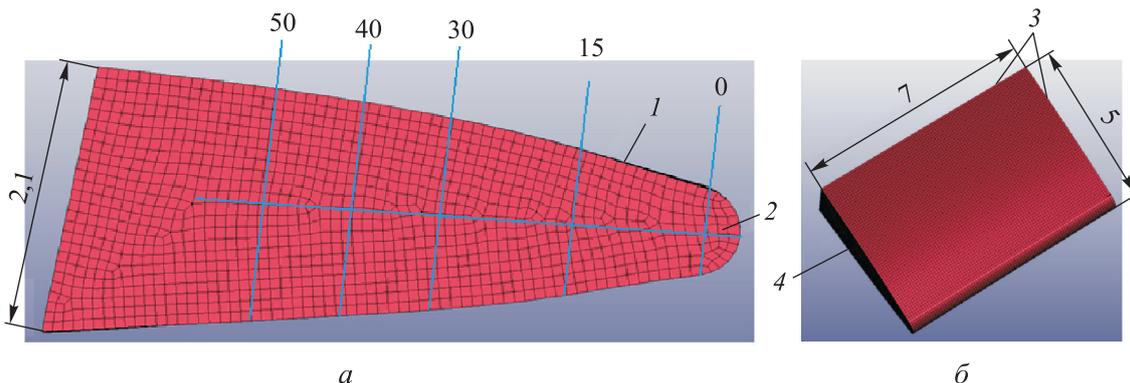


Рис. 1. Модели кромки (а) и ее габаритных размеров с граничными условиями (б): 1 — зона обработки; 2 — середина кромки; 3 и 4 — запрет отражений и перемещений

Исследование влияния режимов ЛУО на распределение ОН в кромке пера лопатки. Проводили моделирование кромки лопатки компрессора, геометрические размеры которой и граничные условия приведены 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 последней. Точка начала ЛУО обозначена линией 0. ЛУО проводили при различных стратегиях обработки, плотности мощности излучения и длине 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.

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 оказались хорошо согласованными с полученными ранее экспериментальными данными для плоских образцов (рис. 3).

Определено влияние стратегии ЛУО на распределение ОН сжатия в кромке пера лопатки. Выбранная стратегия ЛУО использована в полноценной модели кромки пера лопатки. Разработан алгоритм определения оптимальных технологических параметров ЛУО лопатки из титанового сплава.

Алгоритм определения оптимальных технологических параметров ЛУО лопатки из титанового сплава. Вследствие большого ко-

личества переменных варьирование параметров ЛУО целесообразно проводить на элементарных (плоских) образцах, а не на лопатках, так как это требует меньших временных и материальных затрат. Чтобы уменьшить количество требуемых лопаток, для проверки правильности выбранных параметров ЛУО разработан алгоритм определения оптимальных технологических параметров ЛУО лопатки из титанового сплава, блок-схема которого приведена на рис. 4.

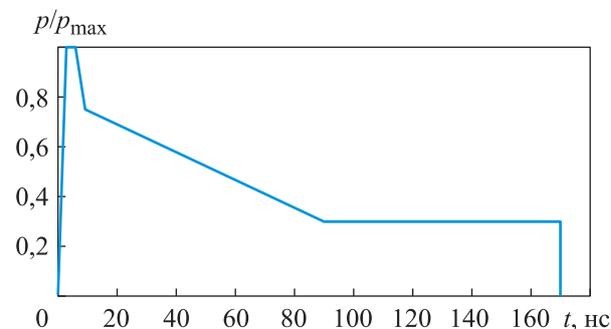


Рис. 2. Влияние продолжительности лазерного импульса t на профиль давления излучения, прикладываемого к пятну

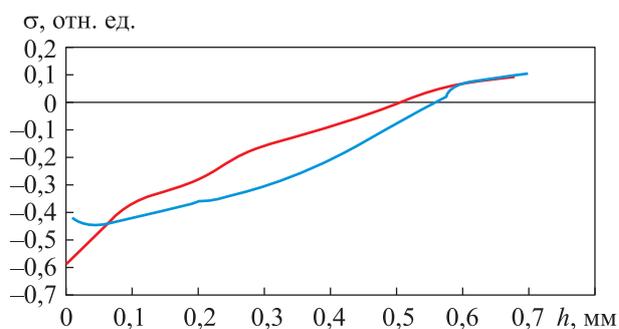


Рис. 3. Распределения ОН σ по глубине ОН h , полученные путем эксперимента (—) и расчета (—)

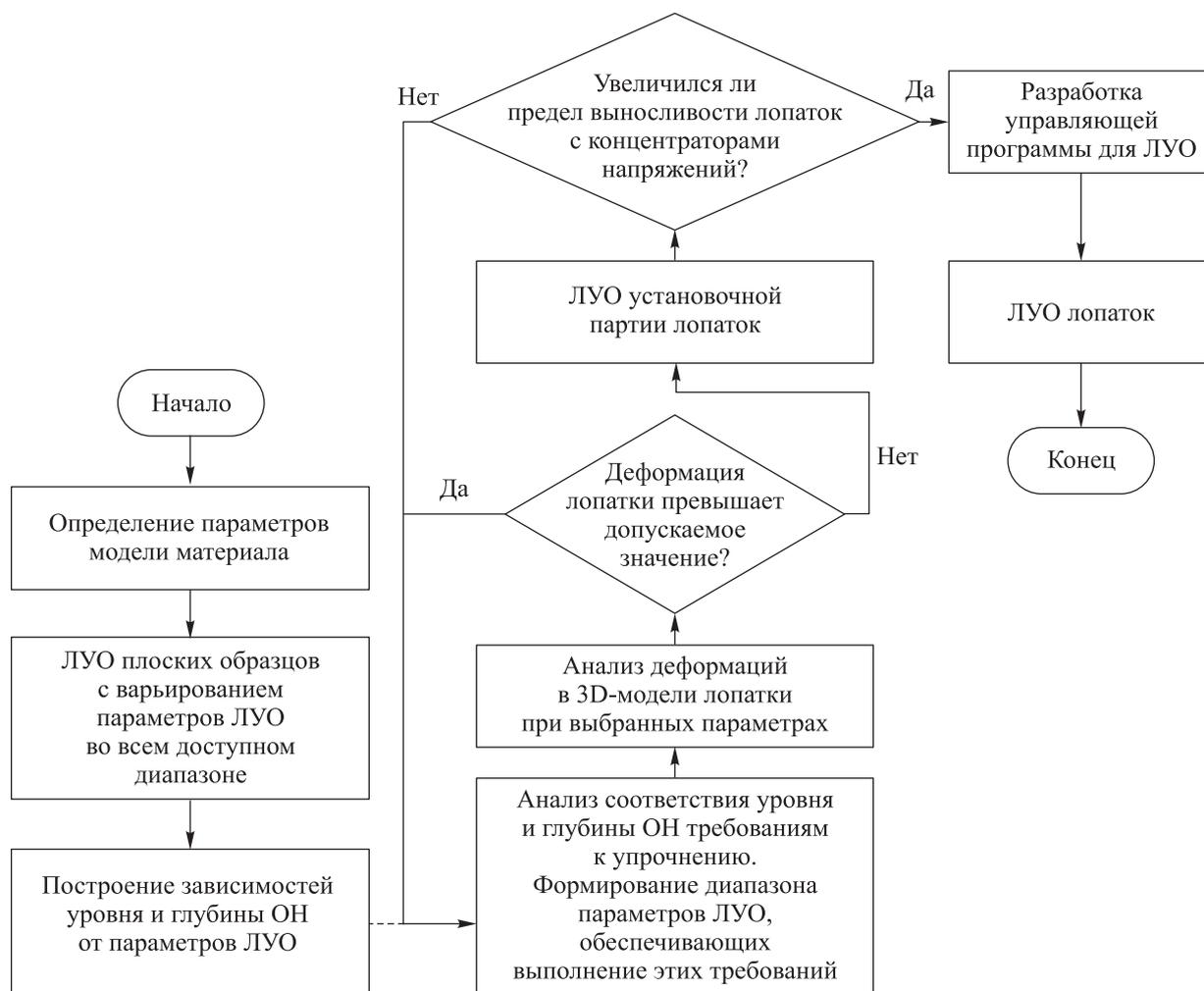


Рис. 4. Блок-схема алгоритма определения оптимальных технологических параметров ЛУО лопатки из титанового сплава

Указанную процедуру необходимо выполнять для всех сплавов, из которых изготовлены лопатки для упрочнения. Параметры модели материала определяют на плоских образцах толщиной 0,8...1,2 мм, а распределение ОН сжатия по глубине лопатки в зависимости от параметров ЛУО во всем доступном диапазоне — на плоских образцах толщиной 2...3 мм. Затем выполняют статистическую обработку результатов для получения регрессионных зависимостей. Далее находят диапазон параметров ЛУО, обеспечивающий заданные свойства в соответствии с требованиями к упрочнению, и, используя эти параметры, анализируют деформации в 3D-модели лопатки.

К упрочнению лопатки предъявляют следующие требования: обеспечение глубины ОН сжатия до 1 мм; деформация лопатки не должна превышать заданное допустимое значения; отсутствие микротрещин на поверхности (так как

титановые сплавы восприимчивы к концентраторам напряжений) и увеличение предела выносливости лопаток, в том числе с забоинами.

Параметры модели материала (модели Джонсона — Кука) [7] подставляют в математическую модель из экспериментальных данных, полученных на предыдущих шагах алгоритма. Если деформация 3D-модели лопатки не превышает допуск, заданный в конструкторской документации, выполняют ЛУО установочной партии лопаток для определения их предела выносливости, в том числе с концентратором напряжений типа забоины глубиной 0,5 и 1,0 мм.

Исследование влияния стратегии ЛУО на распределение ОН в кромке пера лопатки. Результаты исследования — распределения ОН σ в кромке пера лопатки после одновременной и последовательной ЛУО с двух сторон при длине пятна $a = 1, 2$ и 3 мм — приведены на рис. 5, а–е.

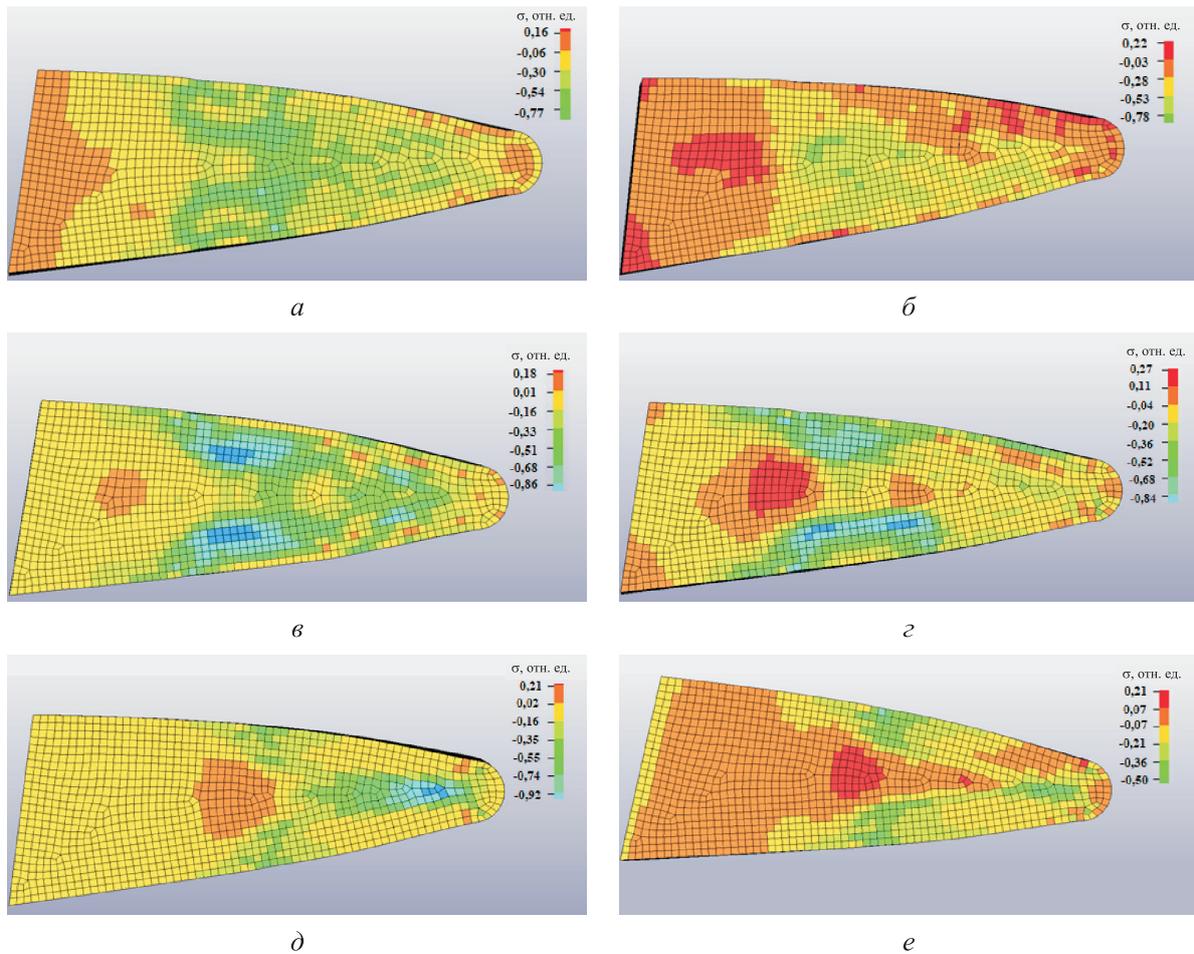


Рис. 5. Распределения ОН σ в кромке пета лопатки после одновременной (*a, в, д*) и последовательной (*б, г, е*) ЛУО с двух сторон при длине пятна $a = 1$ (*a, б*), 2 (*в, г*) и 3 мм (*д, е*)

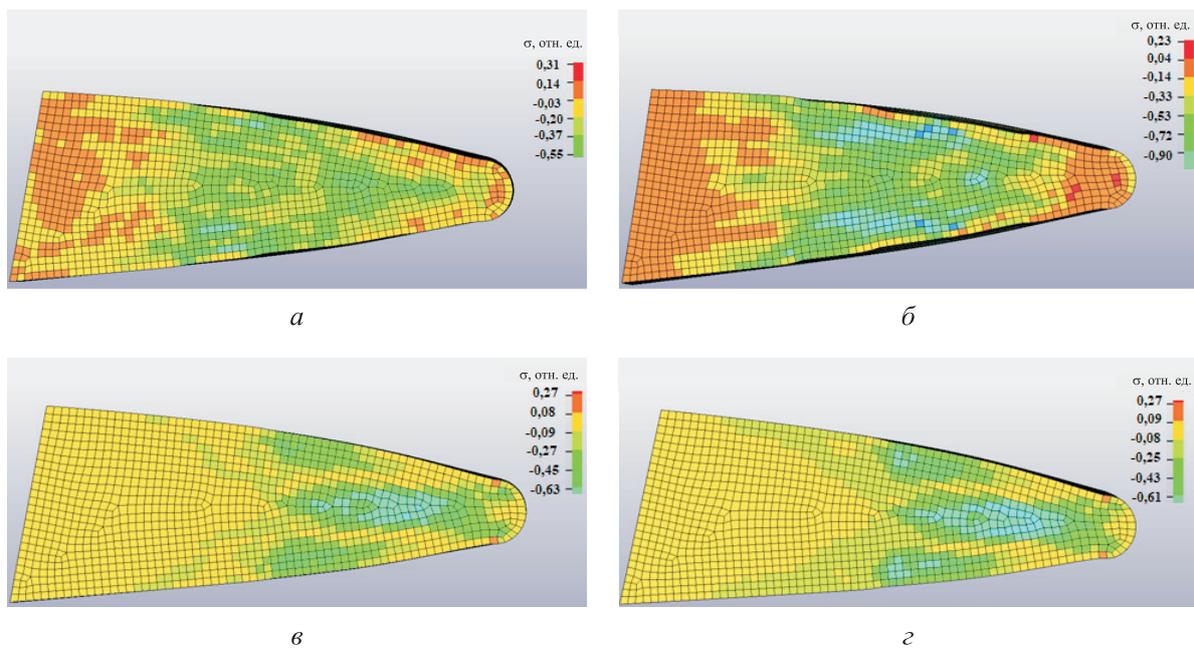


Рис. 6. Распределения ОН сжатия σ в сечении кромки пета лопатки после двухсторонней ЛУО с коэффициентом перекрытия пятен $\eta = 50\%$ при различных значениях относительной плотности мощности излучения и длины пятна:

a — $I/I_{\max} = 0,16$, $a = 2$ мм; *б* — $I/I_{\max} = 0,25$, $a = 2$ мм; *в* — $I/I_{\max} = 0,14$, $a = 3$ мм; *г* — $I/I_{\max} = 0,18$, $a = 3$ мм

Видно, что при последовательной двухсторонней стратегии ЛУО и длине пятна $a = 1$ мм на стороне, обратной обрабатываемой, появляются зоны ОН растяжения. При $a = 2$ и 3 мм также на обратной стороне кромки пера лопатки обнаружены участки ОН растяжения. Стратегия одновременной двухсторонней ЛУО обеспечивает более равномерное распределение ОН сжатия в кромке пера лопатки за один проход. Изменение длины пятна приводит к изменению зоны высоких ОН сжатия, которых следует избегать, так как они являются потенциальным очагом зарождения трещин.

Исследование влияния плотности мощности излучения и длины пятна на распределение ОН в кромке пера лопатки. Результаты исследования — распределения ОН сжатия σ в сечении кромки пера лопатки после двухсторонней ЛУО с коэффициентом перекрытия пятен $\eta = 50$ % при различных значениях относительной плотности мощности излучения I/I_{\max} и длины пятна — приведены на рис. 6, a – z . Здесь I и I_{\max} — плотность мощности излучения и ее максимальное значение.

При длине пятна $a = 2$ мм увеличение плотности мощности излучения приводит к появлению ОН растяжения от радиуса кромки до глубины 0,7 мм. При длине пятна $a = 3$ мм измене-

ние плотности мощности излучения вызывает изменение ОН только в середине кромки с шагом $\sigma = -0,01$ отн. ед. (зона на глубине 0,8...2,0 мм).

По результатам исследований определен допустимый диапазон плотности мощности излучения для обеспечения ОН сжатия в кромке пера лопатки.

Выводы

1. Предложен алгоритм определения оптимальных технологических параметров ЛУО лопатки ГТД из титанового сплава.

2. Стратегия одновременной двухсторонней ЛУО обеспечивает более равномерное распределение ОН сжатия в кромке пера лопатки, чем стратегия последовательной двухсторонней ЛУО. Изменение длины пятна приводит к изменению зоны высоких ОН сжатия, которых следует избегать, так как они являются потенциальным очагом зарождения трещин.

3. Увеличение плотности мощности лазерного излучения приводит к наведению ОН растяжения в радиусе кромки пера лопатки при длине пятна 2 мм. Определен допустимый диапазон плотности мощности излучения для обеспечения ОН сжатия в кромке пера лопатки.

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/gidrodobestrujnyj-metod-uprochneniya-detalej-gtd/> (дата обращения: 15.06.2024).
- [3] Rotella G., Rinaldi S., Filice L. 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>
- [4] Новиков И.А., Ножницкий Ю.А., Шибяев С.А. Мировой опыт в исследовании и применении технологического процесса лазерной ударной обработки металлов (обзор). *Авиационные двигатели*, 2022, № 2, с. 59–82, doi: https://doi.org/10.54349/26586061_2022_1_59
- [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] Ширияев 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. Vol. 1. *Springer*, 2022, 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] 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*. T. 2 [Fundamentals of design of aircraft engines and power plants. Vol. 2]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 368 p. (In Russ.).
- [2] *Gidrodobestruiyuyuy metod uprochneniya detaley GTD osnovannyy na plasticheskom deformirovani 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/gidrodobestruiyuy-metod-uprochneniya-detalej-gtd/> (accessed: 15.06.2024). (In Russ.).
- [3] Rotella G., Rinaldi S., Filice L. 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>
- [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 PNIPIU. Mashinostroenie, materialovedenie* [Bulletin PNIPIU. 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*. Vol. 1. Springer, 2022, 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 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, Комсомольский пр-т, д. 93, e-mail: milenin-as@avid.ru).

Information about the authors

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

MILENIN Artem Sergeevich — Head of the Department КО-2993. UEC-Aviadvigatel JSC (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 стратегии обработки на распределение остаточных напряжений сжатия в кромке пера лопатки из титанового сплава. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 8, с. 40–48.

Please cite this article in English as:

Shiryaev A.A., Milenin A.S. 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. 8, pp. 40–48.