

УДК 621.787, 539.372

## Влияние формы профиля давления на распределение остаточных напряжений при лазерной ударной обработке кромки пера лопатки из титанового сплава

А.А. Ширияев, А.С. Миленин

АО «ОДК-Авиадвигатель»

## Effect of pressure profile shape on residual stress distribution during laser shock peening of titanium alloy blade airfoil edges

A.A. Shiryayev, A.S. Milenin

UEC-Aviadvigatel JSC

Исследовано влияние профиля импульса давления квадратного лазерного пятна с размером стороны 3 мм на распределение остаточных напряжений сжатия на участке кромки пера лопатки компрессора из титанового сплава при математическом моделировании лазерной ударной обработки. Обработка выполнена лазерным лучом без перекрытия пятен за один проход с обеих сторон кромки пера лопатки. Моделирование лазерной ударной обработки включало в себя два этапа. На первом этапе проведено моделирование распространения упругопластических волн на основе определяющего соотношения Джонсона — Кука, на втором — статический расчет распределения остаточных напряжений. По результатам моделирования установлено, что обратный профиль импульса давления приводит к большим поверхностным остаточным напряжениям сжатия (до  $-0,50$  отн. ед.), глубина которых не превышает  $0,07$  мм. Прямой профиль импульса давления обеспечивает уровень остаточных напряжений сжатия  $-0,21 \dots -0,14$  отн. ед. на глубине до  $0,14$  мм. При этом в середине кромки пера лопатки образуется зона с остаточными напряжениями растяжения, достигающими  $0,06$  отн. ед.

EDN: KMJCVE, <https://elibrary/kmjcvе>

**Ключевые слова:** лазерная ударная обработка, титановый сплав, остаточные напряжения, кромка лопатки, профиль импульса давления

The influence of the pressure pulse profile of a square laser spot with a side size of 3 mm on the distribution of residual compressive stresses on the edge of a compressor blade airfoil made of titanium alloy was studied using mathematical modeling of laser shock peening. The machining was performed by a laser beam without spot overlapping in a single pass on both sides of the blade airfoil edge. The modeling of laser shock peening included two stages. In the first stage, the propagation of elastic-plastic waves was simulated based on the Johnson-Cook constitutive relation, and in the second, a static calculation of the residual stress distribution was performed. The modeling results showed that the inverse pressure pulse profile leads to high surface residual compressive stresses (up to  $-0.50$  relative units), the depth of which does not exceed  $0.07$  mm. The direct pressure pulse profile ensures a level of residual compressive stresses of  $-0.21 \dots -0.14$  relative units at a depth of up to

0.14 mm. In this case, in the middle of the blade feather edge, a zone with residual tensile stresses reaching 0.06 relative units is formed.

EDN: KMJCVE, <https://elibrary/kmjcvе>

**Keywords:** laser shock peening, titanium alloy, residual stress, blade edge, pressure pulse profile

Повышение усталостной долговечности деталей, особенно тонкостенных (лопаток компрессора), газотурбинного двигателя (ГТД) является актуальной задачей в авиастроении, так как от этого напрямую зависят эксплуатационные характеристики ГТД [1, 2].

Создание эпюры остаточных напряжений (ОН) сжатия на определенную глубину, относящийся к способам увеличения усталостной долговечности, существенно повышает прочностные характеристики деталей ГТД, их износостойкость и коррозионную стойкость, позволяет замедлить образование и рост трещин [3–5]. Для достижения этой цели применяют различные методы упрочнения поверхностного слоя [6–8], в том числе лазерную ударную обработку (ЛУО) [9–11].

Преимуществами ЛУО перед другими методами [9] являются большая глубина распространения ОН сжатия ( $h > 0,3$  мм) и возможность обработки таких тонкостенных элементов ГТД, как кромка пера лопатки [12–15].

Так как основная проблема ЛУО лопаток компрессора заключается в отклонении геометрических характеристик профиля пера лопатки от заданных, упрочнение необходимо проводить одновременно с обеих сторон.

При упрочнении материала с помощью ЛУО (рис. 1) сначала на его поверхность наносят защитный слой, а затем — прозрачный слой. Защитным слоем для предотвращения повреждения поверхностного слоя детали служит черная

краска, поливинилхлоридная лента или алюминиевая фольга. В качестве прозрачного слоя чаще всего выступает дистиллированная вода.

ЛУО — быстропротекающий процесс (длительностью несколько наносекунд), поэтому при приложении давления в металле возникает ударная волна. Если давление за фронтом ударной волны превышает упругий предел Гюгонио (Hugoniot Elastic Limit — HEL), то появляются пластические деформации, приводящие к появлению ОН сжатия. Если же давление за фронтом, равное пиковому давлению плазмы, меньше HEL, то пластического деформирования металла не происходит, т. е. все деформации имеют упругий характер.

Сфокусированное на мишени импульсное лазерное излучение переводит небольшое количество вещества в плазмообразное состояние (рис. 2) [16]. Образование плазмы происходит в очень тонком слое (3...6 мкм), толщина которого не превышает толщину защитного слоя. При использовании защитного слоя целевой материал остается холодным во время обработки, и только распространяющаяся механическая ударная волна вызывает изменение свойств материала.

Цель работы — определить влияние профиля импульса давления в момент лазерного удара на распределение ОН в кромке пера лопатки.

Большая часть исследований процесса ЛУО связана с изменением таких параметров, как

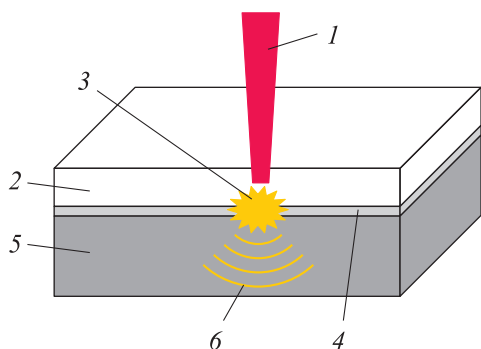


Рис. 1. Схема ЛУО:

1 — лазерный луч; 2 — ограничивающий слой; 3 — плазма; 4 — абляционное покрытие; 5 — обрабатываемый материал; 6 — ударная волна

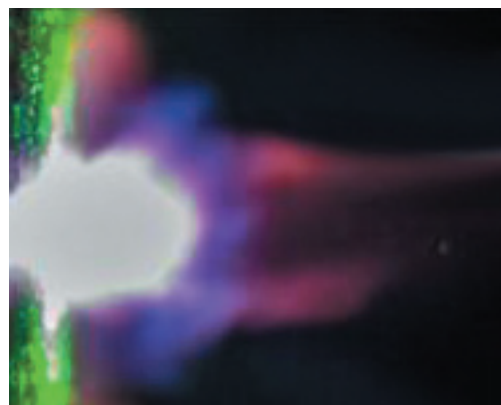


Рис. 2. Внешний вид лазерного факела

энергия лазера (плотность мощности излучения  $I$ ) [17], число его проходов [18] или коэффициент перекрытия лазерных пятен [19]. По влиянию формы профиля импульса давления на распределение ОН найдена только одна работа [20].

Установлены формы импульсов давления, сгенерированных лазерным воздействием с помощью фотонного доплеровского измерителя скорости (ФДИС). Схема измерения скорости перемещения свободной поверхности образца приведена на рис. 3. Формы импульса давления  $p/p_{\max}$  при размере стороны квадратного лазерного пятна  $a = 3$  мм и относительной плотности мощности излучения  $I/I_{\max} = 0,1$  и  $0,2$  показаны на рис. 4. Здесь  $p_{\max}$  — максимальное давление;  $I_{\max}$  — максимальная плотность мощности излучения;  $t$  — время. Импульс давления имеет треугольный профиль.

В работе [20] установлено, что форма импульса давления оказывает значительное влияние

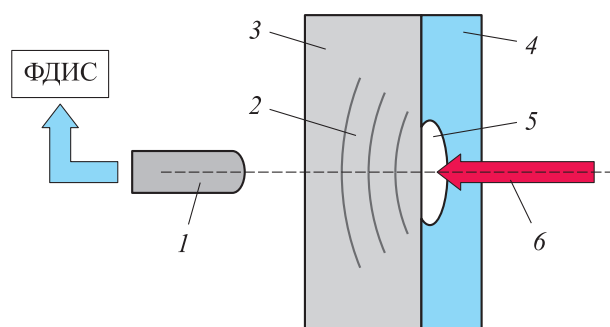


Рис. 3. Схема измерения скорости перемещения свободной поверхности образца:  
1 — измерительный зонд; 2 — упругопластическая волна; 3 — образец; 4 — вода; 5 — плазма; 6 — лазерный импульс

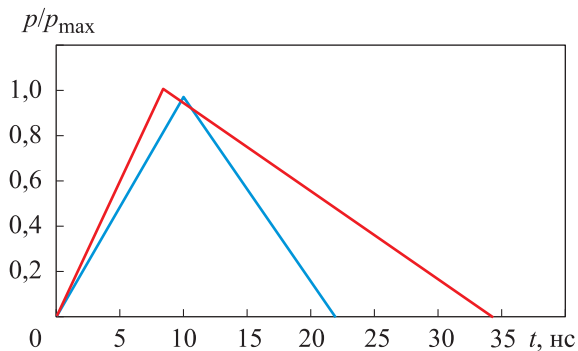


Рис. 4. Формы импульса давления  $p/p_{\max}$  при размере стороны квадратного лазерного пятна  $a = 3$  мм и относительной плотности мощности излучения  $I/I_{\max} = 0,1$  (—) и  $0,2$  (—)

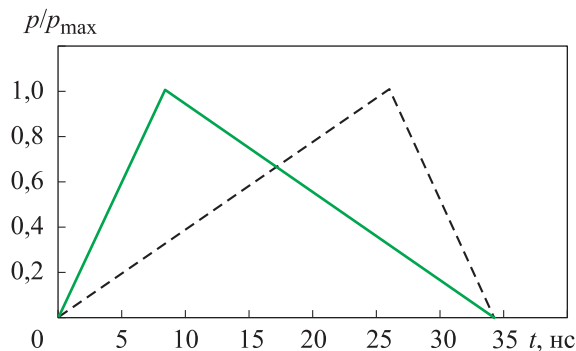


Рис. 5. Профили прямого (—) и обратного (---) импульсов давления

на эпюру ОН по глубине. Треугольный профиль импульса давления с положительным наклоном и монотонно возрастающей мощностью к пику (обратный) приводит к большему давлению и, соответственно, ОН сжатия по глубине, чем профиль импульса давления с отрицательным наклоном (прямой). Плотность мощности прямого и обратного импульсов давления была одинаковой и составляла  $10 \text{ ГВт/см}^2$ . Исследование выполнено на плоских образцах. Примеры профилей прямого и обратного импульсов давления приведены на рис. 5.

Для определения влияния формы профиля импульса давления на распределение ОН в кромке пера лопатки проводили математическое моделирование процесса ЛУО. Геометрические размеры кромки лопатки и граничные условия указаны на рис. 6, 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 нулем.

Профили прямых импульсов давления, прикладываемых к лазерному пятну, показаны на рис. 7, обратные импульсы использованы как зеркальные к прямым (см. рис. 5).

ЛУО осуществляли при различных стратегиях обработки, относительной плотности мощности излучения и длине стороны лазерного пятна. В качестве формы лазерного пятна выбрали квадрат, так как распределение энергии в зоне воздействия излучения близко к однородному. ЛУО выполняли в один проход без перекрытия лазерных пятен, что обеспечило наименьшее время обработки. Для дискретизации расчетной области использовали восьми-узловые конечные элементы, размер стороны которых составлял  $0,1$  мм.

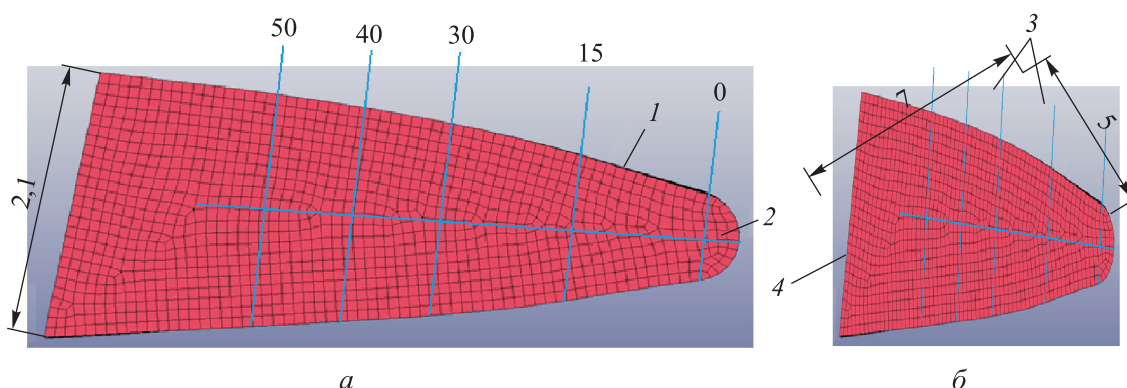


Рис. 6. Модели кромки (а) и ее габаритных размеров с граничными условиями (б):

1 — зона обработки; 2 — середина кромки;  
3 и 4 — запрет отражений и перемещений

Для моделирования процесса ЛУО использовали модель Джонсона — Кука

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

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

Поведение упругого материала, принятое изотропным, описывали законом Гука с двумя параметрами — модулем Юнга и коэффициентом Пуассона. Параметры обрабатываемого титанового сплава приведены в таблице.

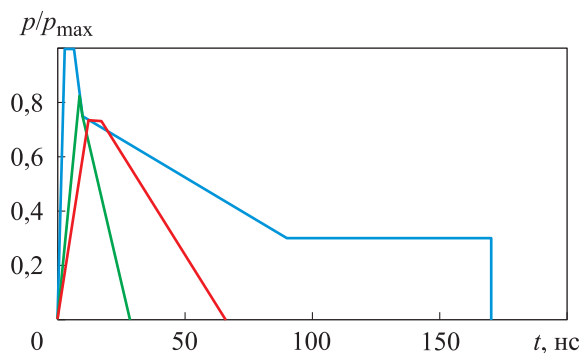


Рис. 7. Профили прямого импульса давления № 1 (—), 2 (—) и 3 (—) при плотности мощности излучения  $I = 6 \text{ ГВт/см}^2$

По результатам моделирования получены распределения ОН в сечениях кромок пера лопаток, приведенные на рис. 8.

Увеличение площади прямой формы импульса лазера привело к смещению зоны ОН сжатия на глубину 0,10...0,35 мм с появлением ОН растяжения в поверхностном слое. При профиле давления в поверхностном слое ОН сжатия  $\sigma = -0,15$  отн. ед. глубина  $h$  достигает 0,17 мм.

Использование обратной формы импульса лазера приводит к более высоким ОН сжатия в поверхностном слое ( $\sigma = -0,50...-0,34$  отн. ед.) по сравнению со значениями для прямой формы ( $\sigma = -0,15...0,10$  отн. ед.), одновременно с меньшей глубиной ОН сжатия.

Параметры обрабатываемого титанового сплава

| Параметр                                                                | Значение |
|-------------------------------------------------------------------------|----------|
| Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>                                    | 4424     |
| Модуль упругости $E$ , ГПа                                              | 122      |
| Коэффициент Пуассона $\nu$                                              | 0,314    |
| Квазистатический предел текучести $A$ , МПа                             | 404      |
| Коэффициент упрочнения $B$ , МПа                                        | 509,75   |
| Показатель деформационного упрочнения $n$                               | 0,506    |
| Параметр, определяющий скоростную чувствительность $C$                  | 0,014    |
| Контрольная скорость деформации $\dot{\varepsilon}_0$ , с <sup>-1</sup> | 0,001    |

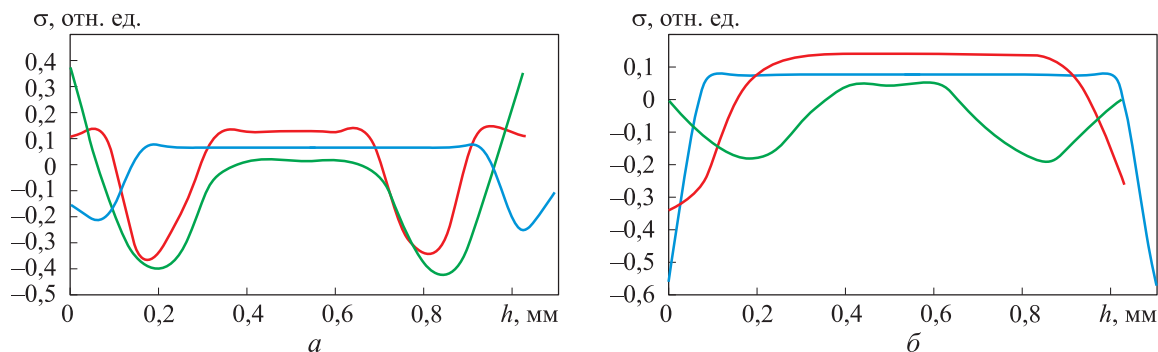


Рис. 8. Распределения ОН по глубине  $h$  при плотности мощности излучения  $I = 6 \text{ ГВт/см}^2$  для прямого (а) и обратного (б) профилей импульса давления № 1 (—), 2 (—) и 3 (—)

## Выводы

1. Установлено, что обратный профиль импульса давления приводит к большим поверхностным ОН сжатия (до  $-0,5$  отн. ед.) при меньшей глубине, чем прямой профиль.

2. Применяя обратный профиль импульса давления, можно обеспечить высокие ОН сжатия, выполняя ЛУО при более щадящих режимах по сравнению таковыми для прямого импульса давления. Особенно это касается кромок пера лопаток, имеющих толщину около  $0,1 \text{ мм}$ .

## Литература

- [1] Иноземцев А.А. Развитие технологий в отечественном гражданском авиадвигателестроении. *Труды Академии наук авиации и воздухоплавания*. 2024, № 1, с. 4–17.
- [2] Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. *Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок*. Т. 2. Москва, Машиностроение, 2008. 366 с.
- [3] Wang M., Chen X., Dai F. et al. Effects of different laser shock processes on the surface morphology and roughness of TC4 titanium alloy. *J. Mater. Process. Technol.*, 2024, vol. 325, art. 118301, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118301>
- [4] 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, vol. 88, no. 5–8, pp. 1557–1565, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8873-0>
- [5] Umapathi A., Swaroop S. Mechanical properties of a laser peened Ti-6Al-4V. *Opt. Laser Technol.*, 2019, vol. 119, art. 105568, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105568>
- [6] Ляхович Л.С., ред. *Химико-термическая обработка металлов и сплавов*. Москва, Металлургия, 1981. 424 с.
- [7] *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: 15.09.2025).
- [8] Габов И.Г., Миленин А.С., Ширяев А.А. и др. Влияние малопластичного выглаживания на параметры поверхностного слоя образцов лопаток компрессора газотурбинного двигателя из титанового сплава. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 4, с. 39–46. EDN: LWOQOQ
- [9] 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, т. 25, № 4, с. 109–117.
- [10] Новиков И.А., Ножницкий Ю.А., Шибяев С.А. Мировой опыт в исследовании и применении технологического процесса лазерной ударной обработки металлов (обзор). *Авиационные двигатели*, 2022, № 2, с. 59–82, doi: [https://doi.org/10.54349/26586061\\_2022\\_1\\_59](https://doi.org/10.54349/26586061_2022_1_59)
- [11] 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>

- [12] 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, vol. 559, pp. 683–692, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.09.009>
- [13] Ширяев А.А., Габов И.Г., Миленин А.С. и др. Влияние лазерного ударного упрочнения на параметры поверхностного слоя лопаток компрессора газотурбинного двигателя из титанового сплава. *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*, 2024, т. 26, № 1, с. 66–73.
- [14] 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>
- [15] 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>
- [16] Лебедев В.Ф. *Лазерная фотоника*. Санкт-Петербург, Университет ИТМО, 2019. 105 с.
- [17] Abeens M., Muruganandhan R., Thirumavalavan K. et al. Surface modification of AA7075 T651 by laser shock peening to improve the wear characteristics. *Mater. Res. Express*, 2019, vol. 6, no. 6, art. 066519, doi: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab0b0e>
- [18] Zhang W., Lu J., Luo K. Residual stress distribution and microstructure at a laser spot of AISI 304 stainless steel subjected to different laser shock peening impacts. *Metals*, 2015, vol. 6, no. 1, art. 6, doi: <https://doi.org/10.3390/met6010006>
- [19] Zhu R., Zhang Y., Lin C. et al. Residual stress distribution and surface geometry of medical Ti13Nb13Zr alloy treated by laser shock peening with flat-top laser beam. *Surf. Topogr.: Metrol. Prop.*, 2020, vol. 8, no. 4, art. 045026, doi: <https://doi.org/10.1088/2051-672X/abce15>
- [20] Zhou L., Zhu C., Yuan H. et al. Influence of the laser pulse time profile on residual stress characteristics in laser shock Peening. *Opt. Express*, 2023, vol. 31, vol. 11, art. 18039, doi: <https://doi.org/10.1364/OE.489426>

## References

- [1] Inozemtsev A.A. Development of technologies in domestic civil aircraft engine manufacturing. *Trudy Akademii nauk aviatsii i vozdukhoplavaniya*, 2024, no. 1, pp. 4–17. (In Russ.).
- [2] Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A., Sandratskiy V.L. *Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok*. T. 2 [Fundamentals of aircraft engine and power plant design. Vol. 2]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 366 p. (In Russ.).
- [3] Wang M., Chen X., Dai F. et al. Effects of different laser shock processes on the surface morphology and roughness of TC4 titanium alloy. *J. Mater. Process. Technol.*, 2024, vol. 325, art. 118301, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118301>
- [4] 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, vol. 88, no. 5–8, pp. 1557–1565, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8873-0>
- [5] Umapathi A., Swaroop S. Mechanical properties of a laser peened Ti-6Al-4V. *Opt. Laser Technol.*, 2019, vol. 119, art. 105568, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105568>
- [6] Lyakhovich L.S., ed. *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov i spлавov* [Chemical-thermal treatment of metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981. 424 p. (In Russ.).
- [7] *Gidrodobestruynyy metod uprochneniya detaley GTD, osnovanny na plasticheskom deformirovani poverkhnostnogo sloya* [Hydro-shot blasting method for strengthening gas turbine engine parts based on plastic deformation of the surface layer], gidroabraziv.com: website. URL: <https://www.gidroabraziv.com/technology/gidrodobestrujnyj-metod-uprochneniya-detalej-gtd/> (accessed: 15.09.2025). (In Russ.).
- [8] Gabov I.G., Milenin A.S., Shiryayev A.A. et al. Low-plastic burnishing impact on the surface layer parameters of samples of the gas turbine engine compressor blades made of titanium alloy. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2024, no. 4, pp. 39–46. EDN: LWOQO (in Russ.).
- [9] Shiryayev 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, vol. 25, no. 4, pp. 109–117. (In Russ.).

- [10] Novikov I.A., Nozhnitskiy Yu.A., Shibaev S.A. International experience in research and application of the technological process of laser shockpeening of metals (review). *Aviatsionnye dvigateli* [Aviation Engines], 2022, no. 2, pp. 59–82, doi: [https://doi.org/10.54349/26586061\\_2022\\_1\\_59](https://doi.org/10.54349/26586061_2022_1_59) (in Russ.).
- [11] 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>
- [12] 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, vol. 559, pp. 683–692, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.09.009>
- [13] Shiryayev A.A., Gabov I.G., Milenin A.S. et al. Influence of laser impact hardening on the parameters of the surface layer of turbine engine compressor blades made of titanium alloy. *Vestnik PNIPU. Mashinostroyeniye, materialovedeniye* [Bulletin PNRPU. Mechanical Engineering, Materials Science], 2024, t. 26, no. 1, pp. 66–73. (In Russ.).
- [14] 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>
- [15] 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>
- [16] Lebedev V.F. *Lazernaya fotonika* [Laser photonics]. Sankt-Peterburg, Universitet ITMO Publ., 2019. 105 p. (In Russ.).
- [17] Abeens M., Muruganandhan R., Thirumavalavan K. et al. Surface modification of AA7075 T651 by laser shock peening to improve the wear characteristics. *Mater. Res. Express*, 2019, vol. 6, no. 6, art. 066519, doi: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab0b0e>
- [18] Zhang W., Lu J., Luo K. Residual stress distribution and microstructure at a laser spot of AISI 304 stainless steel subjected to different laser shock peening impacts. *Metals*, 2015, vol. 6, no. 1, art. 6, doi: <https://doi.org/10.3390/met6010006>
- [19] Zhu R., Zhang Y., Lin C. et al. Residual stress distribution and surface geometry of medical Ti13Nb13Zr alloy treated by laser shock peening with flat-top laser beam. *Surf. Topogr.: Metrol. Prop.*, 2020, vol. 8, no. 4, art. 045026, doi: <https://doi.org/10.1088/2051-672X/abce15>
- [20] Zhou L., Zhu C., Yuan H. et al. Influence of the laser pulse time profile on residual stress characteristics in laser shock peening. *Opt. Express*, 2023, vol. 31, no. 11, art. 18039, doi: <https://doi.org/10.1364/OE.489426>

Статья поступила в редакцию 17.10.2025

## Информация об авторах

**ШИРЯЕВ Алексей Александрович** — инженер отдела КО-2993. АО «ОДК-Авиадвигатель» (614990, Пермь, Российская Федерация, Комсомольский пр-т, д. 93, e-mail: [shiryayev-aal@avid.ru](mailto:shiryayev-aal@avid.ru)).

**МИЛЕНИН Артем Сергеевич** — начальник отдела КО-2993. АО «ОДК-Авиадвигатель» (614990, Пермь, Российская Федерация, Комсомольский пр-т, д. 93, e-mail: [milenin-as@avid.ru](mailto: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: [shiryayev-aal@avid.ru](mailto:shiryayev-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](mailto:milenin-as@avid.ru)).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ширяев А.А., Миленин А.С. Влияние формы профиля давления на распределение остаточных напряжений при лазерной ударной обработке кромки пера лопатки из титанового сплава. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 8, с. 85–91.

### Please cite this article in English as:

Shiryayev A.A., Milenin A.S. Effect of pressure profile shape on residual stress distribution during laser shock peening of titanium alloy blade airfoil edges. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 8, pp. 85–91.