

УДК 621.787, 539.372

Влияние плотности мощности лазерной ударной обработки на пиковое давление, профиль импульса и остаточные напряжения в образцах из титановых сплавов

А.А. Ширяев

АО «ОДК-Авиадвигатель»

Effect of laser shock peening power density on peak pressure, pulse profile and residual stresses in titanium alloy specimens

A.A. Shiryayev

UEC-Aviadvigatel JSC

Исследовано влияние плотности мощности лазерной ударной обработки на давление ударной волны и уровень остаточных напряжений. Выполнено сравнение форм импульсов давления при одинаковой плотности мощности для титановых сплавов с целью последующего математического моделирования процесса лазерной ударной обработки. Анализ результатов исследования для нескольких материалов показал, что при определенной плотности мощности уровень остаточных напряжений выходит на асимптоту и далее почти не изменяется. Причем в зависимости от типа сплава меняется не только наклон кривой, но и плотность мощности, при которой остаточное напряжение выходит на асимптоту при одном проходе лазера. При увеличении числа проходов лазера уровень и глубина остаточных напряжений возрастают линейно — до 10...15 и 30 % соответственно. После одного прохода лазера у большинства материалов максимальное значение остаточных напряжений находится в диапазоне $(-0,5...0,7)\sigma_{0,2}$, после двух — в интервале $(-0,5...0,8)\sigma_{\text{в}}$. Причем лазерная ударная обработка определенных металлов, в частности алюминиевых сплавов, приводит к созданию остаточного напряжения, равного $-0,9\sigma_{0,2}$ и более при двух проходах и выше.

EDN: AGQQQB, <https://elibrary/agqqqb>

Ключевые слова: лазерная ударная обработка, титановые сплавы, остаточные напряжения, профиль давления

The effect of laser shock peening power density on shock wave pressure and residual stress level was investigated. Pressure pulse shapes at the same power density were compared for titanium alloys for the purpose of subsequent mathematical modeling of the laser shock peening process. Analysis of the study results for several materials showed that at a certain power density, the residual stress level reaches an asymptote and then remains virtually unchanged. Moreover, depending on the alloy type, not only the slope of the curve but also the power density at which the residual stress reaches an asymptote after one laser pass changes. With an increase in the number of laser passes, the level and depth of residual stress increase linearly — up to 10...15 and 30%, respectively. After one laser pass, the maximum residual stress value for most materials is in the range of $(-0.5...0.7)\sigma_{0,2}$, and after two passes, in the range of $(-0.5...0.8)\sigma_{\text{в}}$. Moreover, laser impact treatment of certain metals, in particular

aluminum alloys, leads to the creation of residual stress equal to $-0.9\sigma_{0.2}$ and more with two passes or more.

EDN: AGQQQB, <https://elibrary/agqqqb>

Keywords: laser shock peening, titanium alloys, residual stresses, pressure profile

Повышение усталостной долговечности деталей газотурбинного двигателя (ГТД) является актуальной задачей в авиастроении. Особенно это касается тонкостенных деталей (лопаток компрессора), так как от этого напрямую зависят эксплуатационные характеристики ГТД [1, 2]. Одним из способов увеличения усталостной долговечности является создание эпюры остаточных напряжений сжатия (далее ОН) на определенную глубину. Это существенно повышает прочностные характеристики, стойкость к износу и коррозии деталей ГТД, а также замедляет образование и рост трещин [3–5].

Для наведения эпюр ОН применяют различные методы упрочнения поверхностного слоя [6–8], в том числе лазерную ударную обработку (ЛУО) [9–11]. К преимуществам ЛУО перед другими методами упрочнения относятся большая глубина распространения ОН (более 0,3 мм) [9] и возможность обработки таких тонкостенных элементов ГТД, как кромки пера лопаток [12–15].

При проведении ЛУО по схеме, показанной на рис. 1, на поверхность обрабатываемого материала сначала наносят защитный слой, а затем — прозрачный. В качестве защитного слоя выступает черная краска, ПВХ лента или алюминиевая фольга. Прозрачным слоем чаще всего служит дистиллированная вода.

ЛУО — быстропротекающий процесс (продолжительностью 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 возникновению ОН. Если же давление за фронтом, равное пиковому давлению плазмы, меньше HEL, то пластического деформирования металла не происходит, т. е. все деформации упругие.

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

Цель работы — оценить влияние плотности мощности ЛУО на пиковое давление и уровень ОН, а также сравнить профили импульсов давления для титановых сплавов.

Влияние плотности мощности ЛУО на давление ударной волны. Пиковое давление $p/p_{\max}$ (где p и $p_{\max}$ — текущее и максимальное давление), генерируемое при ЛУО, является фундаментальным параметром, влияющим на глубину пластической деформации, а следовательно, на глубину ОН.

В зависимости от параметров лазера α (где α — доля внутренней энергии плазмы, затраченной на повышение давления плазмы) обычно находится в диапазоне 0,3...0,5. При плотности мощности ЛУО $I_0 \leq 10$ ГВт/см² $\alpha = 0,3$. Давление от лазерного импульса определяется выражением [16]

$$p = 0,01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \sqrt{ZI_0}, \quad (1)$$

где Z — приведенный акустический импеданс, г/(см²·с), ограничивающего Z_1 и целевого Z_2 материалов, $2/Z = 1/(Z_1 + Z_2)$.

Зависимости пикового давления $p/p_{\max}$ от относительной плотности мощности ЛУО $I/I_{\max}$ приведены на рис. 2. Здесь I и $I_{\max}$ — плотность мощности ЛУО и ее максимальное значение. В отличие от формулы (1) при достижении

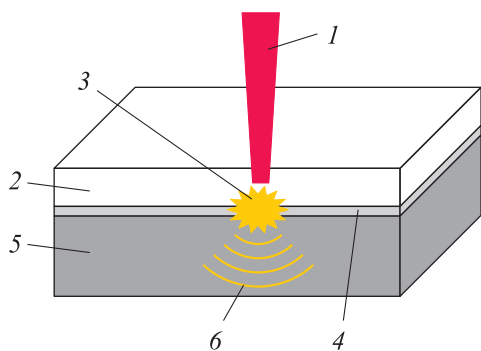


Рис. 1. Схема ЛУО:

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

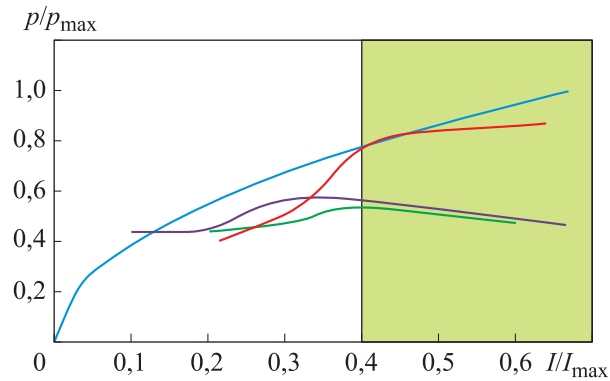


Рис. 2. Зависимости пикового давления $p/p_{\max}$ от относительной плотности мощности ЛУО $I/I_{\max}$ для различных обрабатываемых материалов и форм лазерного пятна:
— теоретическая; — титан № 1, круглое пятно;
— титан № 2, круглое пятно; — титан № 2, квадратное пятно

относительной плотности мощности ЛУО $I/I_{\max} \approx 0,4$ пиковое давление выходит на асимптоту, что соответствует зоне, выделенной зеленым цветом.

Как видно из рис. 2, в диапазоне $I/I_{\max} = 0,20 \dots 0,33$ зависимости пикового давления от относительной плотности мощности ЛУО для титановых сплавов № 1 и 2 не изменяются. Однако при увеличении до $I/I_{\max} = 0,40$ у титанового сплава № 1 пиковое давление резко возрастает до $p/p_{\max} = 0,74$, а у титанового сплава № 2 падает до $p/p_{\max} = 0,44$.

Влияние плотности мощности ЛУО на уровень ОН. Анализ полученных результатов для различных материалов показал, что при определенной плотности мощности ЛУО значение ОН выходит на асимптоту, а далее почти не из-

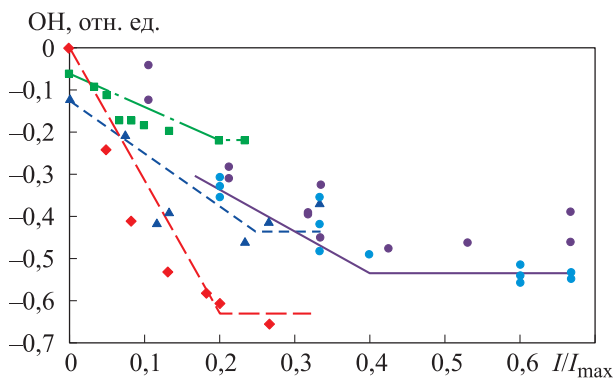


Рис. 3. Зависимости ОН от относительной плотности мощности ЛУО $I/I_{\max}$ для обрабатываемых материалов:
▲ и — сталь; ♦ и — никелевый сплав;
■ и — алюминиевый сплав; ● и — титановый сплав № 1; ● — титановый сплав № 2

меняется (рис. 3). Причем в зависимости от типа сплава меняется не только наклон кривой, но и плотность мощности ЛУО, при которой ОН сплава выходит на асимптоту. При увеличении числа проходов уровень и глубина ОН возрастают линейно — до 10...15 и 30 % соответственно.

Точками на рис. 3 показаны экспериментальные данные для каждого из сплавов. По экспериментальным точкам построены билинейные кривые, описывающие изменение уровня ОН от плотности мощности ЛУО для каждого из сплавов.

После одного прохода лазера у большинства материалов максимальный уровень ОН приближается к диапазону $(-0,5 \dots 0,7)\sigma_{0,2}$ (рис. 4), а после двух — к интервалу $(-0,5 \dots 0,8)\sigma_v$ (рис. 5). Здесь $\sigma_{0,2}$ и σ_v — пределы текучести и прочности. ЛУО определенных металлов, в частности

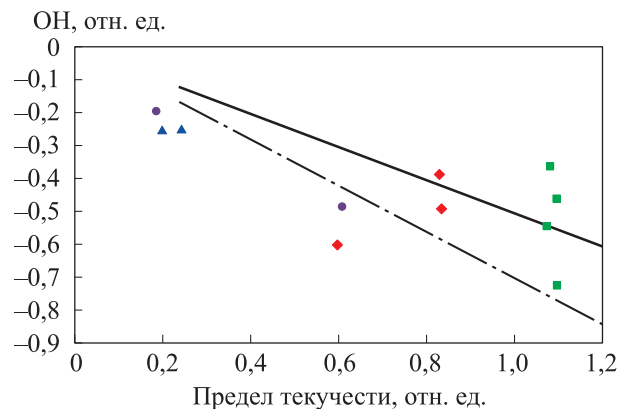


Рис. 4. Зависимости ОН от предела текучести различных материалов после одного прохода лазера:
▲ — сталь; ♦ — никелевый сплав; ■ — титановый сплав;
● — алюминиевый сплав; — — $0,5\sigma_{0,2}$; - - - — $0,7\sigma_{0,2}$

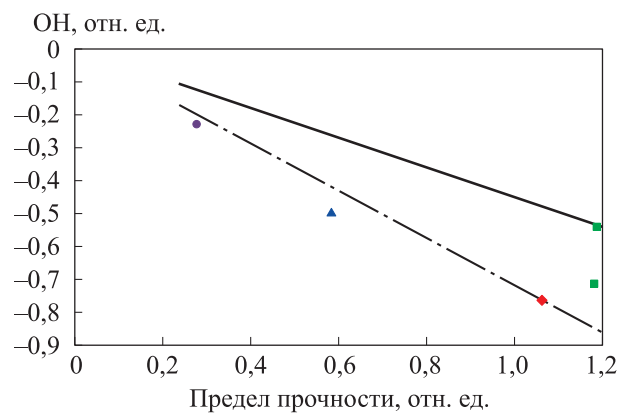


Рис. 5. Зависимости ОН σ от предела прочности давления обрабатываемых материалов после двух проходов лазера:
▲ — сталь; ♦ — никелевый сплав; ■ — титановый сплав;
● — алюминиевый сплав; — — $0,5\sigma_v$; - - - — $0,8\sigma_v$

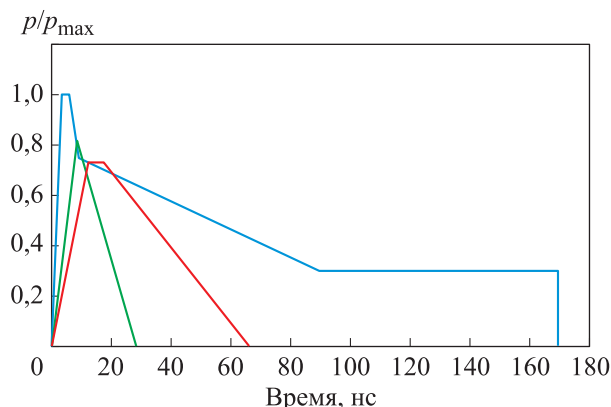


Рис. 6. Результаты сравнения профилей импульса давления для обрабатываемых материалов при относительной плотности мощности ЛУО $I/I_{max} = 0,20$ и различных значениях времени импульса:
 — титан № 1, 25 нс; — титан № 1, 10 нс;
 — титан № 2, 10 нс

алюминиевых сплавов, вызывает напряжения, которые могут достигать $-0,9\sigma_{0,2}$ или даже его превышать.

Сравнение профилей импульса давления для титановых сплавов. Результаты сравнения профилей давления при относительной плотности мощности ЛУО $I/I_{max} = 0,20$ приведены на рис. 6. Профиль импульса давления для титанового сплава № 1 взят из работы [17].

Изучение профиля импульса давления актуально для последующего математического мо-

делирования процесса ЛУО с целью построения эпюры ОН по глубине.

Установлено, что профиль импульса давления необходимо определять для всех изучаемых материалов, так как сплавы, имеющие схожие механические свойства, но отличающиеся друг от друга маркой (содержанием химических элементов) могут иметь разные формы профиля.

Выводы

1. Анализ результатов исследования для нескольких материалов показал, что при определенной плотности мощности ЛУО уровень ОН выходит на асимптоту и далее почти не изменяется. Причем в зависимости от типа сплава меняется не только наклон кривой, но и плотность мощности лазера, при которой сплав выходит на асимптоту. При увеличении числа проходов лазера уровень и глубина ОН увеличиваются линейно — до 10...15 и 30 % соответственно.

2. После одного прохода лазера у большинства материалов максимальный уровень ОН находится в диапазоне $-(0,5...0,7)\sigma_{0,2}$, а после двух — в интервале $(-0,5...0,8)\sigma_{\text{в}}$. Причем ЛУО определенных металлов, в частности алюминиевых сплавов, приводит к созданию ОН, равному $-0,9\sigma_{0,2}$ и более.

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. 368 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. 5-9, 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/gidrodrobestruijnyj-metod-uprochneniya-detalej-gtd/> (дата обращения: 15.08.2025).

- [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., 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
- [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.2021.107163>
- [16] Fabbro R., Peyre P., Berthe L. et al. Physics and applications of laser-shock processing. *J. Laser Appl.*, 1998, vol. 10, no. 6, pp. 265–279, doi: <https://doi.org/10.2351/1.521861>
- [17] Bartolomei M., Kudryashev I., Sabirov R. et al. Numerical study of residual stress fields after double-sided symmetric laser shock peening of blade edge. *Frat Integrita Strut.*, 2025, vol. 19, no. 72, pp. 26–33, doi: <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.72.03>

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 designing aircraft engines and power plants. Vol. 2]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 368 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. 5-9, 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 of strengthening gas turbine engine parts based on plastic deformation of the surface layer]. gidroabraziv.com: website. URL: <https://www.gidroabraziv.com/technology/gidrodobestruyniy-metod-uprochneniya-detalej-gtd/> (accessed: 15.08.2025). (In Russ.).

- [8] Gabov I.G., Milenin A.S., Shiryaev 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. Mashinostroyeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2024, no. 4, pp. 39–46. EDN: LWOQO (in Russ.).
- [9] Shiryaev A.A., Gabov I.G., Milenin A.S. et al. Comparison of hardening methods on blades of titanium alloy. *Vestnik PNIPU. Mashinostroyeniye, materialovedeniye* [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 (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] Shiryaev 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, vol. 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.2021.107163>
- [16] Fabbro R., Peyre P., Berthe L. et al. Physics and applications of laser-shock processing. *J. Laser Appl.*, 1998, vol. 10, no. 6, pp. 265–279, doi: <https://doi.org/10.2351/1.521861>
- [17] Bartolomei M., Kudryashev I., Sabirov R. et al. Numerical study of residual stress fields after double-sided symmetric laser shock peening of blade edge. *Frat Integrata Strut.*, 2025, vol. 19, no. 72, pp. 26–33, doi: <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.72.03>

Статья поступила в редакцию 21.08.2025

Информация об авторе

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

Information about the author

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

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ширяев А.А. Влияние плотности мощности лазерной ударной обработки на пиковое давление, профиль импульса и остаточные напряжения в образцах из титановых сплавов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 5, с. 71–76.

Please cite this article in English as:

Shiryaev A.A. Effect of laser shock peening power density on peak pressure, pulse profile and residual stresses in titanium alloy specimens. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 5, pp. 71–76.