

УДК 621.787, 539.372

Влияние плотности мощности и размера пятна лазера на форму импульса давления при лазерной ударной обработке образцов из титанового сплава

А.А. Ширяев¹, А.С. Миленин¹, О.А. Плехов²,
А.Н. Вшивков², Е.А. Гачегова²

¹ АО «ОДК-Авиадвигатель»

² Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН

Effect of pressure pulse shape on power density and laser spot size in laser shock peening of titanium alloy samples

A.A. Shiryaev^{1,2}, A.S. Milenin¹, O.A. Plehov³,
A.N. Vshivkov³, E.A. Gachegova³

¹ UEC-Aviadvigatel JSC

² Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

Определены формы импульсов давления для круглых и квадратных пятен лазера при различной плотности мощности излучения с помощью фотонного доплеровского измерителя скорости. Полученные формы импульсов давления позволили уточнить математическую модель процесса лазерной ударной обработки в части построения эпюры остаточных напряжений. Проведено измерение профиля скорости перемещения свободной поверхности образца при лазерной ударной обработке с относительной плотностью мощности излучения 0,10...0,63 на плоских образцах из титанового сплава толщиной 0,35...1,20 мм. Получен характерный профиль упругопластической волны в образце из титанового сплава. Установлено, что при круглом пятне лазера с повышением плотности мощности излучения форма импульса давления почти не изменяется, а при квадратном пятне длительность импульса увеличивается в 1,6–2,3 раза.

EDN: KQBHDB, <https://elibrary/kqbhdb>

Ключевые слова: лазерная ударная обработка, упругопластическая волна, образец из титанового сплава, профиль импульса давления

The pressure pulse shapes were determined for round and square laser spots at different radiation power densities using a photon Doppler velocimeter. The obtained pressure pulse shapes made it possible to refine the mathematical model of the laser impact processing process in terms of constructing a residual stress diagram. The velocity profile of the free surface of the sample was measured during laser shock peening with a relative radiation power density of 0.10...0.63 on flat titanium alloy samples with a thickness of 0.35...1.20 mm. A characteristic profile of the elastic-plastic wave in a titanium alloy sample was obtained. It was found that for a round laser spot, the pressure pulse shape remains virtually unchanged with an increase in the radiation power density, while for a square spot, the pulse duration increases by 1.6-2.3 times.

EDN: KQBHDB, <https://elibrary/kqbhdb>

Keywords: laser shock peening, elastic-plastic wave, titanium alloy sample, pressure pulse profile

Лазерная ударная обработка (ЛУО) отличается от других методов упрочнения поверхностного слоя [1–3] большей глубиной распространения остаточных напряжений сжатия (ОНС, $h > 0,3$ мм) и возможностью обработки тонкостенных элементов газотурбинного двигателя, таких как кромки пера лопаток [4, 5].

Улучшение физико-механических, усталостных и коррозионных свойств при ЛУО обусловлено образованием ОНС и измельчением зерна [6].

При упрочнении материала с помощью ЛУО (рис. 1) сначала на его поверхность наносится защитный слой, а затем прозрачный. В качестве защитного слоя для предотвращения повреждения поверхностного слоя детали выступают черная краска, поливинилхлоридная лента или алюминиевая фольга. В качестве прозрачного слоя чаще всего применяют дистиллированную воду для увеличения порогового значения оптического пробоя [7].

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

Сфокусированное на мишени импульсное лазерное излучение переводит небольшое количество вещества в плазмообразное состояние (рис. 2) [7]. Образование плазмы с температурой до 20 000 К происходит в очень тонком слое (не-

сколько микрометров). При использовании защитного слоя целевой материал остается холодным в процессе обработки, и только распространяющаяся механическая ударная волна вызывает изменения в свойствах материала [8, 9].

При лазерном ударе во время импульса на поверхности материала образуется плазма, которая, расширяясь, генерирует упругопластическую волну. Последняя, распространяясь вглубь материала, вызывает пластические деформации и, как следствие, ОНС. В процессе продвижения ее форма изменяется. Сделана попытка оценить форму (время фронтов нарастания/спада и амплитуду) импульса давления, сгенерированного плазмой в момент лазерного удара.

Исследования ЛУО в основном связаны с ее влиянием на механические и усталостные свойства [10], изменение микроструктуры [11]. Применительно к параметрам ЛУО изучено влияние энергии импульса лазера [12], числа проходов [13] или коэффициента перекрытия лазерного пятна [14] на уровень и глубину ОНС.

Варьирование энергии импульса лазера (200...400 мДж) при обработке алюминиевого сплава АА 7075 показало, что ее увеличение приводит к большим ОНС в образце (–156...–317 МПа), причем глубина остается неизменной (до 0,5 мм). Шероховатость образца при увеличении энергии импульса возрастает от 0,9 мкм при 200 мДж до 2,0 мкм при 400 мДж [12].

В работе [13] на образце из стали AISI 304 ЛУО проведена в одной точке. Диаметр пятна лазера составлял 3 мм, энергия — 9,3 Дж, длительность импульса — 10 нс. Установлено, что изменение числа проходов с одного до трех повысило ОНС с –250 до –370 МПа в поверхностном слое, глубина при этом возросла незначительно (до 0,7 мм).

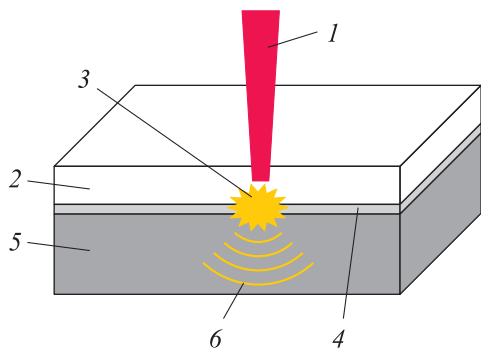


Рис. 1. Схема ЛУО:

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

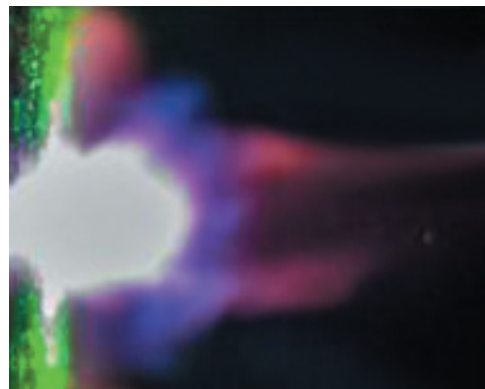


Рис. 2. Внешний вид лазерного факела

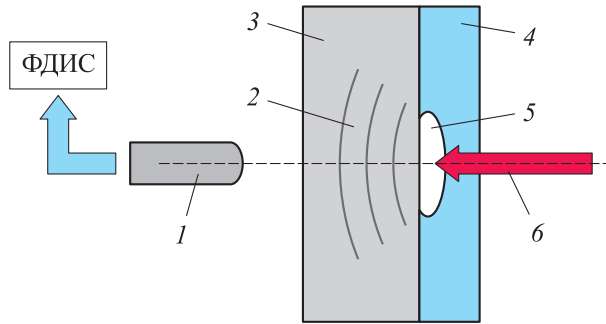


Рис. 3. Схема измерения скорости перемещения свободной поверхности:
1 — измерительный зонд; 2 — упругопластическая волна; 3 — образец; 4 — вода; 5 — плазма; 6 — лазерный импульс

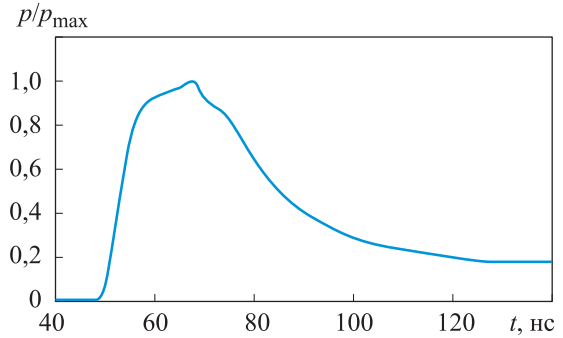


Рис. 4. Влияние длительности лазерного импульса t на профиль давления p/p_{\max} в упругопластической волне, прошедшей через образец из титанового сплава толщиной 0,35 мм

Цель работы — построить форму импульса давления при ЛУО, оценить влияние плотности мощности и формы лазерного пятна на форму импульса давления. Это позволит в дальнейшем использовать форму импульса при моделировании процесса ЛУО для уточнения математической модели.

Для измерения скорости перемещения свободной поверхности образца во время лазерного удара использован фотонный доплеровский

измеритель скорости (ФДИС). Схема измерения этого параметра приведена на рис. 3.

Зная скорость перемещения свободной поверхности v , можно рассчитать давление p в прошедшей через материал упругопластической волне по формуле

$$p = \rho v / 2,$$

где c — скорость продольной волны, $c = 6070$ м/с; ρ — плотность, $\rho = 4450$ кг/м³.

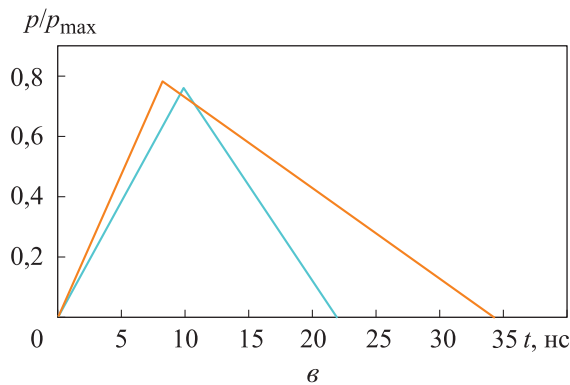
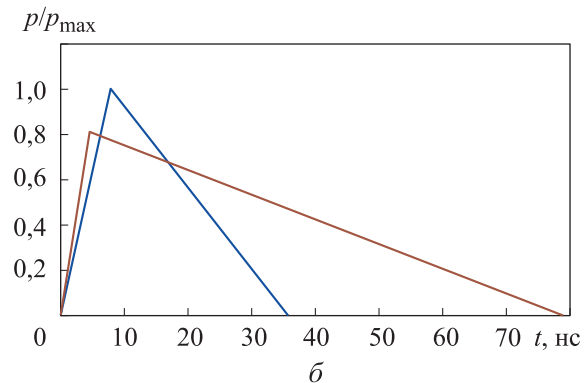
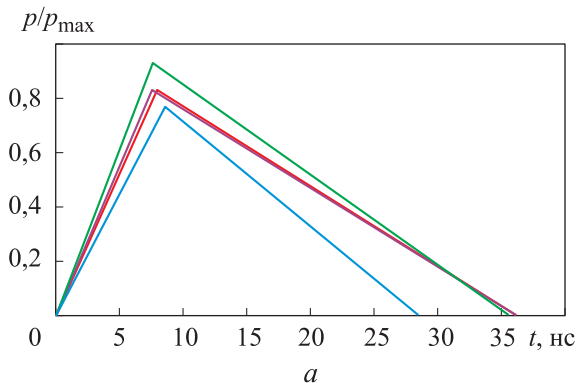


Рис. 5. Формы импульса давления при различных значениях относительной плотности мощности излучения I/I_{\max} , форме и размере пятна лазера:

- а — круглое пятно диаметром 2 мм, $I/I_{\max} = 0,20$ (—), $0,30$ (—), $0,40$ (—), $0,60$ (—);
б — квадратное пятно размером 1 мм, $I/I_{\max} = 0,33$ (—) и $0,66$ (—);
в — квадратное пятно размером 3 мм, $I/I_{\max} = 0,10$ (—) и $0,20$ (—)

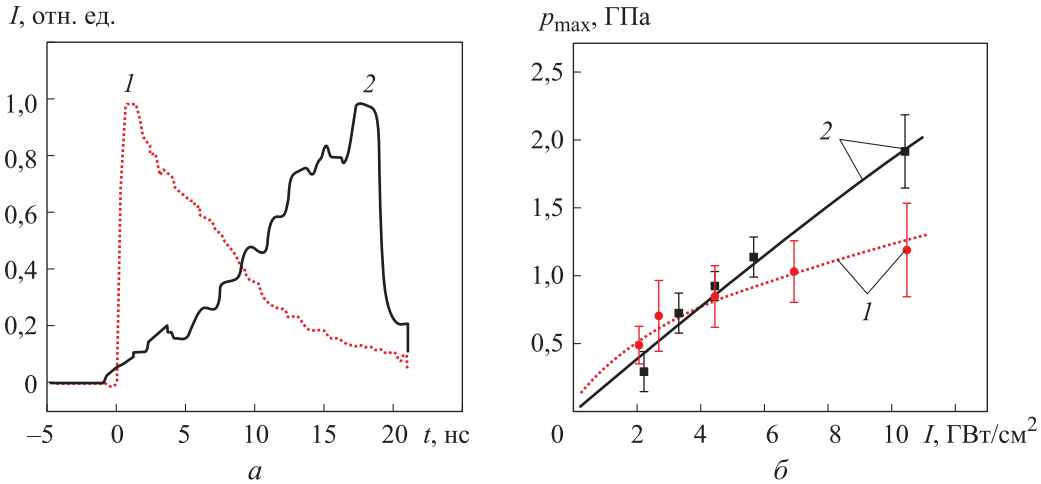


Рис. 6. Результаты сравнения импульсов ДТ (1) и УТ (2):
 а — профили импульсов; б — расчетные (точки) и экспериментальные (линии) зависимости максимального давления p_{max} от плотности мощности излучения I

Проведено измерение профиля скорости перемещения свободной поверхности образца при лазерном ударе с разной относительной плотностью мощности излучения $I/I_{max} = 0,10 \dots 0,63$ на плоских образцах толщиной $0,35 \dots 1,20$ мм. Здесь I и I_{max} — плотность мощности излучения и ее максимальное значение.

Влияние длительности лазерного импульса t на профиль давления p/p_{max} (p_{max} — максимальное давление) в упругопластической волне, прошедшей через образец из титанового сплава толщиной $0,35$ мм, показано на рис. 4.

По измеренным профилям скорости перемещения свободной поверхности образца определены время нарастания и затухания прошедшей упругопластической волны. В результате установлены формы импульса давления, сгенерированные лазерным воздействием. Формы импульса давления при различных значениях относительной плотности мощности излучения I/I_{max} , форме и размере пятна лазера приведены на рис. 5, а–в.

Изменение формы импульса давления, вероятно, связано с размером и формой пятна лазера. Поверхностные волны внутри пятна лазера ведут себя по-разному.

В работе [15] установлено, что форма импульса давления (рис. 6) оказывает значительное влияние на распределение ОНС по глубине (рис. 7). Треугольный профиль давления с положительным наклоном и монотонно возрастающей мощностью к пику (УТ) приводит к большему давлению и, соответственно, большему ОНС, чем профиль давления с отрицательным наклоном (ДТ). Относительная плот-

ность мощности излучения обоих импульсов $I/I_{max} = 0,30$.

На основании изложенного необходимо проверить, можно ли изменить форму импульса давления на используемом оборудовании,

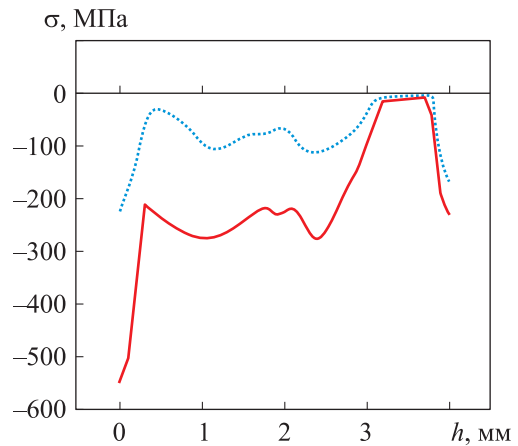


Рис. 7. Распределения ОНС σ по глубине h для импульсов ДТ (.....) и УТ (—) при относительной плотности мощности излучения $I/I_{max} = 0,30$

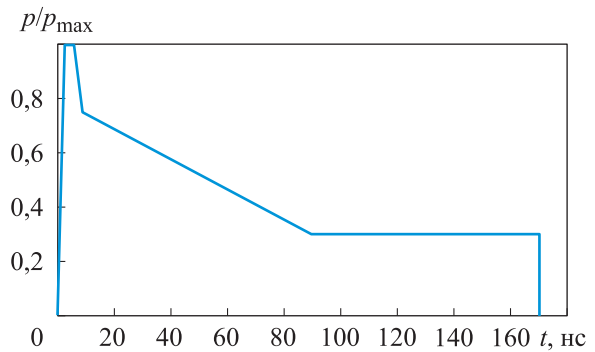


Рис. 8. Влияние длительности лазерного импульса t на профиль давления p/p_{max} без учета данных ФДИС

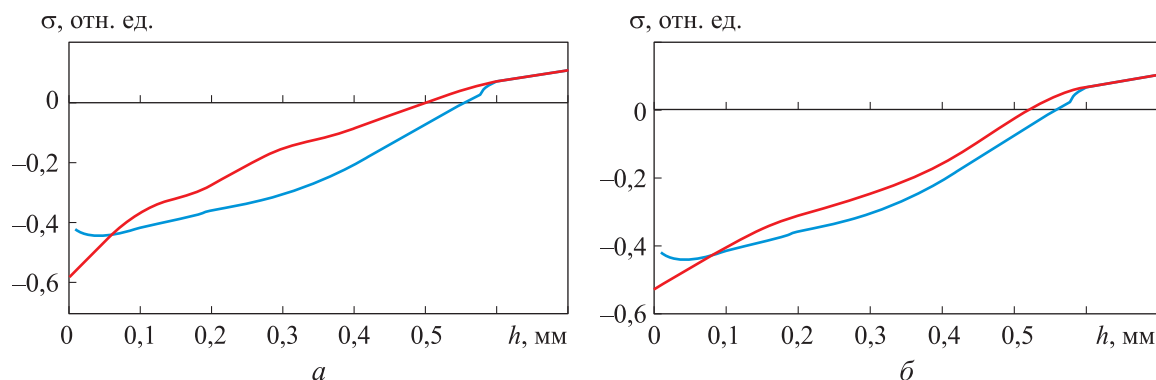


Рис. 9. Экспериментальные (—) и расчетные (—) распределения ОНС σ по глубине h без учета (а) и с учетом (б) новой формы импульса давления

что обеспечит распределение ОНС на большую глубину без изменения параметров ЛУО.

Для уточнения математической модели процесса ЛУО использованы полученные в работе [16] профиль импульса давления (рис. 8) и эпюры ОНС (рис. 9, а).

Эпюры ОНС с учетом новой формы импульса давления, определенной с помощью ФДИС, при тех же параметрах материала, что и в работе [16], приведены на рис. 9, б. Погрешность расчетной модели уменьшилась и не превышала 10 %.

Выводы

1. Проведено измерение профиля скорости перемещения свободной поверхности при ЛУО с разной плотностью мощности излучения на

плоских образцах из титанового сплава толщиной 0,35...1,20 мм. Получен характерный профиль упругопластической волны в образце из титанового сплава.

2. Определены формы импульсов давления для пятен лазера круглой и квадратной форм при различной плотности мощности излучения.

3. Установлено, что при круглом пятне лазера форма импульса давления с повышением плотности мощности излучения почти не изменяется, а при квадратном пятне длительность импульса увеличивается в 1,6–2,3 раза.

4. Показано, что профиль с положительным наклоном и монотонно возрастающей мощностью к пику приводит к большему давлению и, соответственно, большему ОНС по глубине, чем профиль давления с отрицательным наклоном.

Литература

- [1] Борисенок Г.В., Васильев Л.А., Ворошнин Л.Г. и др. *Химико-термическая обработка металлов и сплавов*. Москва, Металлургия, 1981. 424 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: 15.09.2025).
- [3] Инструментальные технологии улучшения металлических поверхностей. URL: https://www.rp-ural.ru/wp-content/uploads/2021/05/Ecoroll_RU.pdf (дата обращения: 15.09.2025).
- [4] 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.
- [5] 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
- [6] 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>

- [7] Лебедев В.Ф. *Лазерная фотоника*. Санкт-Петербург, ИТМО, 2019. 150 с.
- [8] Morales M., Porro J.A., Blasco M. et al. Numerical simulation of plasma dynamics in laser shock processing experiments. *Appl. Surf. Sci.*, 2009, vol. 255, no. 10, pp. 5181–5185, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.09.067>
- [9] Pozdnyakov V., Oberrath J. Two-dimensional simulations of laser shock peening of aluminum with water confinement. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2022, vol. 50, no. 2, pp. 534–539, doi: <https://doi.org/10.1109/TPS.2022.3146269>
- [10] Lu H., Wu L., Wei H. et al. Microstructural evolution and tensile property enhancement of remanufactured Ti6Al4V using hybrid manufacturing of laser directed energy deposition with laser shock peening. *Addit. Manuf.*, 2022, vol. 55, art. 102877, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102877>
- [11] Lu J., Lu H., Xu X. et al. High-performance integrated additive manufacturing with laser shock peening — induced microstructural evolution and improvement in mechanical properties of Ti6Al4V alloy components. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2020, vol. 148, art. 103475, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2019.103475>
- [12] 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>
- [13] 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*, 2016, vol. 6, no. 1, art. 6, doi: <https://doi.org/10.3390/met6010006>
- [14] 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>
- [15] 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, pp. 18039–18049, doi: <https://doi.org/10.1364/OE.489426>
- [16] Ширяев А.А., Карманов В.В. Анализ зависимости уровня и глубины остаточных напряжений от параметров лазерного излучения при моделировании лазерной ударной обработки плоских образцов из титанового сплава. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 4, с. 32–40. EDN: Dhthol

References

- [1] Borisenok G.V., Vasilyev L.A., Voroshnin L.G. et al. *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov i spлавov* [Chemical-thermal treatment of metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981. 424 p. (In Russ.).
- [2] *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/> (In Russ.). (accessed: 15.09.2025).
- [3] *Instrumental'nyye tekhnologii uluchsheniya metallicheskih poverkhnostey* [Instrumental technologies for improving metal surfaces]. URL: https://www.rp-ural.ru/wp-content/uploads/2021/05/Ecoroll_RU.pdf (In Russ.). (accessed: 15.09.2025).
- [4] 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, vol. 25, no. 4, pp. 109–117. (In Russ.).
- [5] 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.).
- [6] 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>

- [7] Lebedev V.F. *Lazernaya fotonika* [Laser photonics]. Sankt-Peterburg, ITMO Publ., 2019. 150 p. (In Russ.).
- [8] Morales M., Porro J.A., Blasco M. et al. Numerical simulation of plasma dynamics in laser shock processing experiments. *Appl. Surf. Sci.*, 2009, vol. 255, no. 10, pp. 5181–5185, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.09.067>
- [9] Pozdnyakov V., Oberrath J. Two-dimensional simulations of laser shock peening of aluminum with water confinement. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2022, vol. 50, no. 2, pp. 534–539, doi: <https://doi.org/10.1109/TPS.2022.3146269>
- [10] Lu H., Wu L., Wei H. et al. Microstructural evolution and tensile property enhancement of remanufactured Ti6Al4V using hybrid manufacturing of laser directed energy deposition with laser shock peening. *Addit. Manuf.*, 2022, vol. 55, art. 102877, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102877>
- [11] Lu J., Lu H., Xu X. et al. High-performance integrated additive manufacturing with laser shock peening — induced microstructural evolution and improvement in mechanical properties of Ti6Al4V alloy components. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2020, vol. 148, art. 103475, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2019.103475>
- [12] 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>
- [13] 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*, 2016, vol. 6, no. 1, art. 6, doi: <https://doi.org/10.3390/met6010006>
- [14] 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>
- [15] 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, pp. 18039–18049, doi: <https://doi.org/10.1364/OE.489426>
- [16] Shiryaev A.A., Karmanov V.V. Analysis of the residual stress level and depth dependences originating from the laser radiation parameters in simulating the laser impact machining of flat samples made of the titanium alloy. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2025, no. 4, pp. 32–40. EDN: DHTHOL (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 11.10.2025

Информация об авторах

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

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

ПЛЕХОВ Олег Анатольевич — доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, директор. Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН (614990, Пермь, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 13а, e-mail: psc@permisc.ru).

Information about the authors

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

PLEKHOV Oleg Anatolievich — Doctor of Science (Phys.-Math.), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director. Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (614990, Perm, Russian Federation, Lenina St., Bldg. 13a, e-mail: psc@permisc.ru).

ВШИВКОВ Алексей Николаевич — младший научный сотрудник лаборатории термомеханики твердых тел. Институт механики сплошных сред Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения РАН (614013, Пермь, Российская Федерация, ул. Академика Королева, д. 1, e-mail: vshivkov.a@icmm.ru).

VSHIVKOV Aleksey Nikolaevich — Junior Researcher, Laboratory of Solid Thermomechanics, Institute of Continuous Media Mechanics. Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Science (614013, Perm, Russian Federation, Akademika Koroleva St., Bldg. 1, e-mail: vshivkov.a@icmm.ru).

ГАЧЕГОВА Елена Алексеевна — инженер лаборатории термомеханики твердых тел. Институт механики сплошных сред Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения РАН (614013, Пермь, Российская Федерация, ул. Академика Королева, д. 1, e-mail: vshivkov.a@icmm.ru).

GACHEGOVA Elena Alekseevna — Engineer, Laboratory of Solid Thermomechanics, Institute of Continuous Media Mechanics. Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Science (614013, Perm, Russian Federation, Akademika Koroleva St., Bldg. 1, e-mail: vshivkov.a@icmm.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ширяев А.А., Миленин А.С., Плехов О.А., Вшивков А.Н., Гачегова Е.А. Влияние плотности мощности и размера пятна лазера на форму импульса давления при лазерной ударной обработке образцов из титанового сплава. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 3, с. 62–69.

Please cite this article in English as:

Shiryayev A.A., Milenin A.S., Plehov O.A., Vshivkov A.N., Gachegova E.A. Effect of pressure pulse shape on power density and laser spot size in laser shock peening of titanium alloy samples. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 3, pp. 62–69.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие Л.Д. Мальковой
«Основы проектирования
режущих инструментов.
Модуль 1»**

Направлено на содействие в закреплении и расширении знаний, полученных при изучении лекционного курса «Основы проектирования режущих инструментов». Включает в себя большой объем иллюстративного и справочного материала, ссылок на нормативные документы, пояснений и примеров, способствующих лучшему пониманию и усвоению программы дисциплины. Освещает первую часть курса, в которую вошли четыре базовых раздела: понятийный аппарат, инструментальные материалы, базирование и базовые поверхности и резцы.

Будет полезно при выполнении курсовых проектов по проектированию режущих инструментов, решению профессиональных задач в рамках НИР и дипломного проектирования.

Для студентов, обучающихся по специальности 15.05.01 «Проектирование технологических машин и комплексов» по специализации «Проектирование инструментальных комплексов в машиностроении».

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>