

УДК 621.787, 620.179.18, 621.7.07, 621.789

Влияние частоты импульсов при лазерной ударной обработке на шероховатость и остаточные напряжения образцов из никелевого сплава

А.А. Ширяев¹, В.В. Карманов²¹ АО «ОДК-Авиадвигатель»² ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Effect of pulse frequency in laser shock peening on roughness and residual stresses of nickel alloy specimens

A.A. Shiryayev¹, V.V. Karmanov²¹ UEC-Aviadvigatel JSC² Perm National Research Polytechnic University

Исследовано влияние частоты импульсов лазера на микротвердость, шероховатость, глубину смятия (уменьшение толщины) и остаточные напряжения сжатия поверхностного слоя плоских образцов из никелевого сплава при лазерной ударной обработке. Упрочняющая обработка проведена маломощным лазером Nd:YAG с длительностью импульса 10 нс с одной стороны образца. В качестве защитного слоя использована акриловая краска. Установлено, что при малой частоте импульсов лазерная ударная обработка приводит к образованию больших остаточных напряжений сжатия ($-0,44 \dots -0,28$ отн. ед.), чем при других частотах. Минимальная глубина смятия (7,62 мкм) наблюдалась при частоте импульсов 3 Гц. При всех режимах лазерной ударной обработки параметр шероховатости поверхностного слоя увеличился с 0,32 до 0,90...1,50 мкм. Микротвердость возросла в 1,2–2,0 раза. Под лазерную ударную обработку рекомендовано задавать припуск 7...10 мкм.

EDN: LIQYDT, <https://elibrary/liqydt>**Ключевые слова:** лазерная ударная обработка, шероховатость поверхностного слоя, остаточные напряжения сжатия, глубина смятия, образцы из никелевого сплава

The effect of pulse frequency during laser shock peening on microhardness, roughness, crushing and residual stresses of the surface layer of flat nickel alloy samples is considered. Laser shock peening was performed by a low-power Nd:YAG laser with a pulse duration of 10 ns on one side of the sample. Acrylic paint was used as a protective layer. It was found that laser shock peening at a low frequency led to large compressive residual stresses of $-0.44 \dots -0.28$ rel. units compared to other laser pulse frequencies. At a frequency of 3 Hz, laser impact treatment leads to a minimum compression depth (reduction in sample thickness) of 7.62 μm . Roughness after laser shock peening in all processing modes from 0.32 μm to 0.90...1.50 μm . Microhardness increased by 1.2–2.0 times. It is recommended to include an allowance for laser shock peening of 7...10 μm .

EDN: LIQYDT, <https://elibrary/liqydt>**Keywords:** laser shock peening, surface layer roughness, compressive residual stresses, compression depth, nickel alloy specimens

Лазерная ударная обработка (ЛУО) — перспективная технология упрочнения поверхности изделия, получившая активное распространение после появления нано- и фемтосекундных импульсных лазеров. ЛУО применяют для обработки деталей, которые в силу ограничений геометрических параметров нельзя упрочнить остальными методами, например, кромки пера лопатки.

Основными параметрами ЛУО являются фокусное расстояние, частота импульсов, схема обработки, коэффициент перекрытия лазерных пятен и их диаметр.

Улучшение физико-механических, усталостных характеристик и коррозионных свойств обрабатываемого покрытия обусловлено образованием остаточных напряжений сжатия (ОНС) и измельчением зерна [1, 2]. При ЛУО материал облучают импульсным лазером с длительностью импульса несколько наносекунд и большой плотностью мощности (до 10^{15} Вт/см²) [3, 4]. Облучаемая поверхность, как правило, покрыта непрозрачным слоем с низкой температурой испарения, например черной краской для увеличения поглощения энергии лазера и предотвращения воздействия теплоты на поверхность. Также она находится под слоем воды, сдерживающей распространение температуры плазмы [5]. Плазма вызывает образование высокого давления на испарившейся поверхности. Так как процесс очень короткий и уровень давления очень высокий, создаваемое плазмой давление передается материалу через ударные волны.

Следует отметить, что нестационарные физические процессы, происходящие в поверхностном слое металла за несколько нано- или фемтосекунд, требуют разработки новых физических и математических моделей.

Так, исследовано влияние параметров ЛУО, в том числе числа проходов лазера и диаметра лазерного пятна, на морфологию, микроструктуру, микротвердость и шероховатость обрабатываемой поверхности [6–8].

Выполнена ЛУО режущего инструмента из твердых сплавов BK6, BK8, T5K10, T15K6, TT7K12, KHT-16 и Sandvik [9]. В результате ЛУО стойкость упрочненных инструментов повысилась в 1,42–2,18 раза, гамма-процентная стойкость — в 2,11–2,56 раза, прочность — в 1,20–1,22 раза, интенсивность изнашивания — в 1,21–1,24 раза, коэффициент вариации стойкости снизился в 1,2–3,1 раза.

В работе [10] рассмотрена термическая ЛУО — Warm Laser Shock Peening (WLSP). Это связано с тем, что ОНС, а также наклепанный слой склонны к релаксации под действием механической нагрузки или процесса термического нагрева. Половину начального ОНС можно ослабить менее чем за 10 с даже при умеренной температуре двигателя.

Эксперименты по WLSP выполнены на титановом сплаве Ti6Al4V, алюминиевых сплавах 6061 и 7075, углеродистых сталях AISI 4140 и 1042. Образцы продемонстрировали лучшую циклическую стабильность ОНС.

В работе [6] показаны физические процессы ЛУО, важные факторы, которые могут влиять на процесс обработки и перспективы развития.

Активно ведутся исследования по разработке комбинированных методов обработки, включающих в себя несколько способов упрочнения с целью использования достоинств каждого из них и минимизации недостатков. В публикациях [11–13] исследованы комбинированные методы на основе лазерного и магнитного/ультразвукового воздействий, в статье [14] — возможность комбинации метода лазерной термообработки и прокатки. В результате обработки снизилась шероховатость и повысилась микротвердость поверхности.

Похожее сочетание ЛУО и поверхностного пластического деформирования рассмотрено в работе [15], где сначала проводилась обработка трехроликовым устройством с усилием 100 кг. Вследствие такой комбинированной обработки изменилось напряженно-деформированное состояние упрочненной зоны, а также структура в зоне термического влияния.

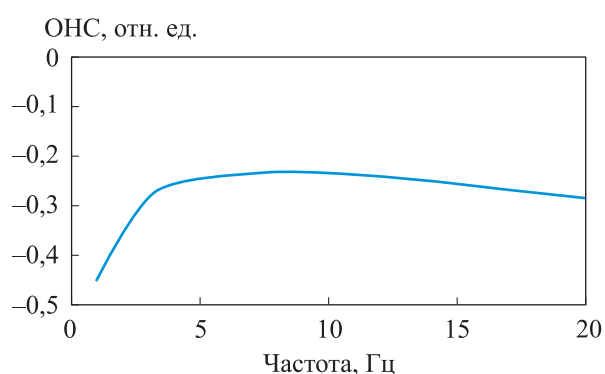
В то же время в открытых источниках не обнаружена информация о влиянии частоты импульса при ЛУО на параметры поверхностного слоя (эпюру ОНС, шероховатость и микротвердость). В большей части работ частота была постоянной величиной и составляла 1 или 5 Гц.

Цель исследования — оценить влияние частоты импульсов лазера при ЛУО на шероховатость, микротвердость, глубину смятия (уменьшение толщины) и уровень ОНС обрабатываемой поверхности.

Методика проведения эксперимента. Образцы и оборудование. В качестве образцов выступали пластины из никелевого сплава размером 105×20×2 мм.

Значения микротвердости, шероховатости и глубины смятия обработанной поверхности

Частота импульсов, Гц	HV	Параметр шероховатости Ra , мкм	Глубина смятия, мкм
БО	434,4	0,324	0,00
1	485,0	1,309	11,00
3	438,2	1,233	7,62
5	492,6	1,517	15,87
10	470,0	0,952	11,62
20	463,2	1,183	10,00



Зависимость ОНС от частоты импульсов лазера после ЛУО

Упрочняющую обработку проводили лазером Nd:YAG мощностью менее 1 Дж и длительностью импульса 10 нс. Длина волны составляла 1064 нм. В качестве защитного слоя применяли акриловую краску. Обработку выполняли с одной стороны при коэффициенте перекрытия лазерных пятен, равном 50 %. В качестве охлаждающего слоя использовали воду.

Глубину смятия слоя определяли с помощью рейсмаса с цифровым индикатором Marh MarCator 1086 R. Шероховатость измеряли прибором Mahr MarSurf PS1 (на базе 1,75 и 5,60 мм), микротвердость — прибором Shimadzu HNV-G21S (нагрузка 9,87 Н).

Измерение ОНС выполняли методом рентгеновской дифрактометрии с помощью комплекса XStress Robot. Частоту импульсов варьировали в диапазоне 1...20 Гц.

Результаты эксперимента. Результаты определения микротвердости, параметра шероховатости Ra и глубины смятия обработанной поверхности приведены в таблице, где БО — без обработки. Значения микротвердости и параметра шероховатости находили как среднее арифметическое пяти измерений, значения глубины смятия — как среднее арифметическое восьми измерений.

Результаты определения влияния частоты импульсов лазера на уровень ОНС приведены на рисунке. Видно, что при частоте импульсов $f = 1$ и 3 Гц ЛУО приводит к образованию больших ОНС, чем при других ее значениях. При частоте импульсов $f = 5...20$ Гц возникают ОНС $\sigma = -0,30...-0,22$ отн. ед.

Выводы

1. Исследовано влияние частоты импульсов лазера при ЛУО на параметры поверхностного слоя образцов из никелевого сплава, по результатам которого установлено следующее:

- шероховатость повысилась в 1,5–3,0 раза, минимальное увеличение наблюдалось при частоте 10 Гц;
- микротвердость возросла в 1,2–2,0 раза;
- при частоте импульсов лазера 3 Гц глубина смятия поверхностного слоя оказалась наименьшей;
- при малых частотах импульсов лазера (1 и 3 Гц) наводились большие ОНС (–0,44...–0,28 отн. ед.), чем при других значениях частоты.

2. ЛУО приводит к значительному повышению шероховатости и изменению глубины смятия поверхностного слоя, вследствие чего необходимо задавать припуск на обработку и последующее полирование.

Литература

- [1] Ren X.D., Zhan Q.B., Yang H.M. et al. The effects of residual stress on fatigue behavior and crack propagation from laser shock processing-worked hole. *Mater. Des.*, 2013, vol. 44, pp. 149–154, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.024>
- [2] 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>

- [3] Бурлаченко О.В., Тихвинская А.Ю., Зеленский А.А. Упрочнение высокопрочного чугуна излучением YAG:Nd-лазера. *Физика и химия обработки материалов*, 2009, № 3, с. 55–57.
- [4] Li B., Zhang Z. Theoretical modeling and analysis for tensioning stress formation mechanism of laser shock tensioning process. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2018, vol. 96, no. 1-4, pp. 247–256, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1607-8>
- [5] Цимбал А.Л. *Лазерное ударное упрочнение*. СПбГУ. Изд-во ИТМО, 2010. 6 с.
- [6] Irizalp S.G., Salklakoglu N., Yilbas B.S. Characterization of microplastic deformation produced in 6061-T6 by using laser shock processing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2014, vol. 71, no. 1–4, pp. 109–115, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5481-0>
- [7] Смирнова Н.А., Мисюров А.И. Особенности образования структуры при лазерной обработке. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012, спец. вып. № 5, с. 115–130, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2012-6-233>
- [8] Ширяев А.А., Миленин А.С. Влияние профиля давления на остаточные напряжения при лазерной ударной обработке кромки пера лопатки из титанового сплава. Климовские чтения — 2025. Перспективные направления развития авиадвигателестроения: сборник статей научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 2025, с. 172–178.
- [9] Пинахин И.А., Черниговский В.А. *Основы объемного импульсного лазерного упрочнения инструментальных и конструктивных материалов*. Ставрополь, Изд-во СКФУ, 2014. 160 с.
- [10] Nagarajan B., Castagne S., Wang Z. et al. Influence of plastic deformation in flexible pad laser shock forming — experimental and numerical analysis. *Int. J. Mater. Form.*, 2017, vol. 10, no. 1, pp. 109–123, doi: <https://doi.org/10.1007/s12289-015-1264-5>
- [11] Пименова Г.П. Ресурс авиационных двигателей и надежность лопаток турбины. *Известия вузов. Авиационная техника*, 1972, № 1, с. 109–114.
- [12] Пригоровский Н.И. *Методы и средства определения полей деформаций и напряжений*. Москва, Машиностроение, 1983. 248 с.
- [13] Короленко Т.И. Программа обеспечения ресурса самолетов Боинг 757, 767. Техническая информация. *ОНТИ ЦАГИ*, 1985, № 12, с. 1–5.
- [14] Котляров В.П. Поверхностная отделочно-упрочняющая обработка с лазерным облучением. *Электронная обработка материалов*, 1987, № 1, с. 12–17.
- [15] Почтенный Е.К. *Прогнозирование долговечности и диагностика деталей машин*. Минск, Наука и техника, 1983. 246 с.

References

- [1] Ren X.D., Zhan Q.B., Yang H.M. et al. The effects of residual stress on fatigue behavior and crack propagation from laser shock processing-worked hole. *Mater. Des.*, 2013, vol. 44, pp. 149–154, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.07.024>
- [2] 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>
- [3] Burlachenko O.V., Tikhvinskaya A.Yu., Zelenskiy A.A. Strengthening of high-strength cast iron by YAG:Nd-laser radiation. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 2009, no. 3, pp. 55–57. (In Russ.).
- [4] Li B., Zhang Z. Theoretical modeling and analysis for tensioning stress formation mechanism of laser shock tensioning process. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2018, vol. 96, no. 1-4, pp. 247–256, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1607-8>
- [5] Tsimbal A.L. *Lazernoe udarnoe uprochnenie*. ITMO, 2010. 6 p. (In Russ.).
- [6] Irizalp S.G., Salklakoglu N., Yilbas B.S. Characterization of microplastic deformation produced in 6061-T6 by using laser shock processing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2014, vol. 71, no. 1-4, pp. 109–115, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5481-0>
- [7] Smirnova N.A., Misurov A.I. Structure formation features at laser processing. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2012, spec. iss. no. 5, pp. 115–130, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2012-6-233> (in Russ.).

- [8] Shiryaev A.A., Milenin A.S. *The influence of pressure profile on residual stresses during laser shock peening of the edge of a titanium alloy blade feather*. Klimovskiye chteniya — 2025. Perspektivnyye napravleniya razvitiya aviadvigatelestroyeniya: sbornik statey nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, 22 oktyabrya 2025 g. Sankt-PeterburgKlimovskiye chteniya — 2025: Perspektivnyye napravleniya razvitiya aviadvigatelestroyeniya: sbornik statey nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 2025, pp. 172–178. (In Russ.).
- [9] Pinakhin I.A., Chernigovskiy V.A. *Osnovy obemnogo impulsnogo lazernogo uprochneniya instrumentalnykh i konstruktivnykh materialov* [Fundamentals of volume pulsed laser hardening of tool and structural materials]. Stavropol, Izd-vo SKFU Publ., 2014. 160 p. (In Russ.).
- [10] Nagarajan B., Castagne S., Wang Z. et al. Influence of plastic deformation in flexible pad laser shock forming — experimental and numerical analysis. *Int. J. Mater. Form.*, 2017, vol. 10, no. 1, pp. 109–123, doi: <https://doi.org/10.1007/s12289-015-1264-5>
- [11] Pimenova G.P. Service life of aircraft engines and reliability of turbine blades. *Izvestiya vuzov. Aviatcionnaya tekhnika*, 1972, no. 1, pp. 109–114. (In Russ.).
- [12] Prigorovskiy N.I. *Metody i sredstva opredeleniya poley deformatsiy i napryazheniy* [Methods and means for determining strain and stress fields]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983. 248 p. (In Russ.).
- [13] Korolenko T.I. Service life assurance program for Boeing 757 and 767 aircraft. Technical Information. *ONTI TsAGI*, 1985, no. 12, pp. 1–5. (In Russ.).
- [14] Kotlyarov V.P. Surface finishing and hardening treatment with laser irradiation. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 1987, no. 1, pp. 12–17. (In Russ.).
- [15] Pochtenny E.K. *Prognozirovanie dolgovechnosti i diagnostika detaley mashin* [Durability prediction and diagnostics of machine parts]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1983. 246 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 13.10.2025

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).

КАРМАНОВ Вадим Владимирович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инновационные технологии машиностроения». ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (614990, Пермь, Российская Федерация, Комсомольский пр-т, д. 29, e-mail: karmanovs@yandex.ru).

Information about the authors

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

KARMANOV Vadim Vladimirovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of the Department of Innovative Mechanical Engineering Technologies. Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Russian Federation, Komsomolskiy Ave., Bldg. 29, e-mail: karmanovs@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ширяев А.А., Карманов В.В. Влияние частоты импульсов при лазерной ударной обработке на шероховатость и остаточные напряжения образцов из никелевого сплава. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 6, с. 32–36.

Please cite this article in English as:

Shiryaev A.A., Karmanov V.V. Effect of pulse frequency in laser shock peening on roughness and residual stresses of nickel alloy specimens. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 6, pp. 32–36.