

УДК 621.373.826 : 621.78+669.018

ВОЗМОЖНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

© 2024 Д.Д. Федотов¹, С.И. Ярьско^{1,2}

¹ Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

² Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 26.06.2024

Рассмотрены возможности применения лазерной ударной обработки (ЛУО), схемы ее реализации, достоинства метода. Приведены сведения об основных направлениях использования ЛУО, к числу которых относятся создание глубоких остаточных напряжений сжатия, увеличение усталостной прочности, повышение коррозионной стойкости и износостойкости. Сделаны выводы о перспективности использования данной технологии для повышения эксплуатационных характеристик изделий машиностроения из конструкционных сталей.

Ключевые слова: лазерная ударная обработка, машиностроение, авиастроение, эксплуатационные характеристики, усталостная прочность, сжимающие напряжения, коррозия, микроструктура

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4(2)-276-280

EDN: JCMWZQ

ВВЕДЕНИЕ

Лазерная ударная обработка (ЛУО) – эффективный метод обработки поверхности, имеющий большие преимущества перед методами механического наклепа сталей и сплавов, например, ультразвуковой или дробеструйной обработкой (ДО). ЛУО часто сравнивают с ДО, которая широко используется в промышленности для упрочнения деталей, однако ЛУО имеет больше достоинств и преимуществ [1, 2]. В частности, ЛУО обеспечивает глубину залегания остаточных напряжений сжатия в 4-5 раз превышающую таковую при ДО [3]. При ЛУО возможна обработка труднодоступных, например, для ДО участков изделий: кромок, углублений, надрезов, пазов и т.д. [4]. Одним из достоинств ЛУО является также возможность упрочнения изделий сложной формы и обработки по заданному контуру. Процесс ЛУО может быть интегрирован в производственную линию с высокой степенью автоматизации.

ВОЗМОЖНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ

Основные направления применения ЛУО:

- образование глубоких остаточных напряжений сжатия и изменение микроструктуры, обеспечивающие существенное увеличение усталостной прочности (долговечности);

Федотов Денис Дмитриевич, аспирант.

E-mail: dnsFdtv62@gmail.com

Ярьско Сергей Игоревич, доктор технических наук, заведующий лабораторией лазерно-индуцированных процессов. E-mail: yarsi54@gmail.com

- увеличение стойкости металлических материалов к коррозии и коррозионному растрескиванию под напряжением, что связано с изменением микроструктуры и наведенными остаточными напряжениями сжатия;

- гибка, формовка металлов, микроструктурирование для улучшения трибологических и других свойств поверхности, лазерная ударная маркировка;

- улучшение свойств материалов для медицинских имплантатов.

Во время ЛУО металл подвергается чисто механическому воздействию, термическим воздействием лазерного излучения на структуру материала можно пренебречь.

За последние два десятилетия процесс ЛУО всесторонне изучался, но в основном это были исследования зарубежных ученых. В настоящее время работы по лазерному наклепу проводятся в большинстве развитых и развивающихся стран (США, Франция, Германия, Великобритания, Испания, Италия, Япония, Ирландия, Китай, Южная Корея, Бразилия, Мексика и др.).

Основные области применения ЛУО:

- авиастроение: производство авиационных двигателей военного и гражданского назначения и иных элементов конструкций самолетов и вертолетов, испытывающих действие циклических нагрузок [5]. Увеличение срока службы авиационных компонентов критичных к усталости: бортовых переборок, узлов крепления крыла, тормозных элементов, шасси и т.д.; повышение надежности сварных соединений; противодействие усталости, усталости вследствие фреттинг-коррозии, трещинообразованию от коррозии под напряжением для кре-

пежных элементов и отверстий под крепеж; повышение выносливости приводных механизмов вертолетов. В рамках общенациональной (США) программы повышения усталостной прочности деталей ГТД технология ЛУО успешно применяется ведущими производителями ГТД (Pratt&Whitney, GE Aviation, SNECMA, Rolls-Royce, MTU Aeroengines);

- энергетика: ЛУО лопаток газовых и паровых турбин энергетических установок;
- медицина: обработка имплантатов для снижения вероятности отторжения [6];
- атомная энергетика: обработка корпусов и сварных швов энергетических реакторов различного типа для повышения стойкости материалов к коррозионному растрескиванию [7];
- машиностроение: обработка деталей машин и сварных швов для увеличения усталостной долговечности.

Лазерному ударному упрочнению подвергаются, прежде всего, изделия из алюминиевых, титановых и никелевых сплавов, сталей различного состава и назначения. Проводятся эксперименты по обработке керамических материалов.

Цель работы – на конкретных примерах из различных отраслей машиностроения показать возможности метода ЛУО для повышения эксплуатационных характеристик изделий из конструкционных сталей.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЛУО И РЕЖИМЫ ОБРАБОТКИ

Для лазерной ударной обработки используют различные лазерные установки: Nd:YAG-лазер с модуляцией добротности (Thales, France) [8] с параметрами 10 нс, 1 Гц при энергии в импульсе до 6 Дж. При проведении, как научных исследований, так и при решении производственных задач нашли применение лазерные системы с пяти координатным программным управлением на основе мощного Nd:YAG-лазера (15 нс, 9 Дж) [9]. Известно проведение экспериментов по ЛУО на установке YS100-R200A (компания Xi'an Tianruida Optoelectronics Technology

Co, China) на основе Nd:YAG-лазера с параметрами 10 нс, 10 Гц, 8 Дж [10] и т.д.

Как правило, ЛУО проводится на режимах, представленных в табл. 1.

Применения ЛУО конструкционных сталей тесно связаны с производством деталей машин и техники авиационной и автомобильной промышленности.

УВЕЛИЧЕНИЕ УСТАЛОСТНОГО РЕСУРСА ДЕТАЛЕЙ ПРИ ЛУО

Наиболее важными эксплуатационными характеристиками при выборе ЛУО в авиастроении являются прочность и надежность деталей в самолетах, так как это напрямую влияет на безопасность авиаперевозок, на безопасность людей. Одним из критичных элементов, определяющим надежность двигателя, являются шестерни трансмиссии (сталь AISI 9310, российский аналог сталь 12Х2Н3МА), имеющие недостаточную усталостную прочность при изгибе [12]. Последнее примерно в 32 % случаев приводит к отказу зубчатых колес. Традиционные методы обработки поверхности, например ДО, не обеспечивают глубину залегания остаточных напряжений сжатия более 0,25 мм, а глубокая прокатка неприменима для обработки кромок и углов изделия. Метод лазерного ударного упрочнения позволяет избежать этих недостатков. Реализация ЛУО (плотность мощности лазерного излучения $w=6-7$ ГВт/см²) зоны корневого скругления зуба шестерни трансмиссии авиадвигателя показана на рис. 1.

Изучение распределения остаточных напряжений, вызванных ЛУО, методами конечно-элементного моделирования (рис. 2) и рентгеноструктурного анализа показывает, что данный метод является эффективным средством повышения усталостной прочности цилиндрической шестерни при изгибе и обеспечивает требуемое распределение остаточных напряжений на корневом скруглении зуба шестерни. Вследствие этого усталостный ресурс зубьев шестерни при изгибе существенно увеличивается. После ЛУО

Таблица 1. Режимы обработки при лазерном ударном упрочнении [9, 11]

Режимы обработки	Диапазон значений
Длина волны, нм	532, 1064
Длительность импульса, нс	10-45
Энергия импульса, Дж	0,5-12
Размер пятна, мм	2-5
Степень перекрытия, %	25-75



Рис. 1. Процесс ЛУО основания шейки зуба шестерни трансмиссии [12]

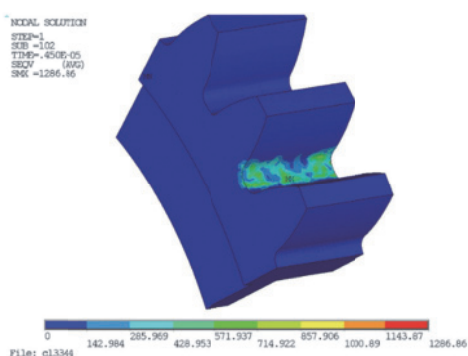


Рис. 2. Распределение напряжений по Мизесу на корневой шейке шестерни [12]



Рис. 3. ЛУО лопаток ротора двигателя

в области скругления корня зубьев преобладают остаточные напряжения сжатия величиной более 680 МПа на глубине почти в 4 раза больше, чем при традиционных методах обработки поверхности.

Высокие требования к элементам аэрокосмического изделия предъявляют циклические нагрузки. Действующие длительное время эти нагрузки могут привести к зарождению трещин и их распространению вглубь материала. Типичным объектом, испытывающим многоцикловую усталость, являются лопатки ротора авиационного двигателя (жаропрочная сталь 09X14N19B2БР1 или жаропрочный сплав ХН35ВТ), работающие при температурах 600-700°С. При использовании лазерного наклепа ($w=3-7$ ГВт/см²) для повышения усталостной прочности ресурс лопаток двигателя (рис. 3) стоимостью 30-40 тыс. \$ США за штуку может быть увеличен в 3-5 раз [5].

Там, где необходима высокая прочность и хорошая коррозионная стойкость изделия, широко используются нержавеющие стали. Обеспечение низкого уровня шума и высокая устойчивость к коррозии обуславливают применение нержавеющей стали AISI 316L (российский аналог – сталь 03X16Н15М3) для изготовления под-

шипников, но при этом из-за низкого предела текучести контактная усталость этого материала существенно ограничивает надежность изделия [8].

Исследования контактной усталости храпового механизма из нержавеющей стали 316L при высокой циклической нагрузке выявили, что остаточные растягивающие напряжения тесно связаны с контактной усталостью и вызывают рост усталостных трещин [8]. При анализе контактной поверхности после испытаний на многоцикловую усталость установлено, что остаточные напряжения сжатия после ЛУО ($w=3,3-6,7$ ГВт/см²) являются основным фактором повышения стойкости к износу при контактной усталости, повышение микротвердости поверхности после ЛУО также способствует улучшению устойчивости к контактной усталости при качении.

ПРИМЕНЕНИЕ ЛУО ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Используя метод лазерного ударного упрочнения, можно доработать технологию изготовления ряда толстостенных деталей, например,

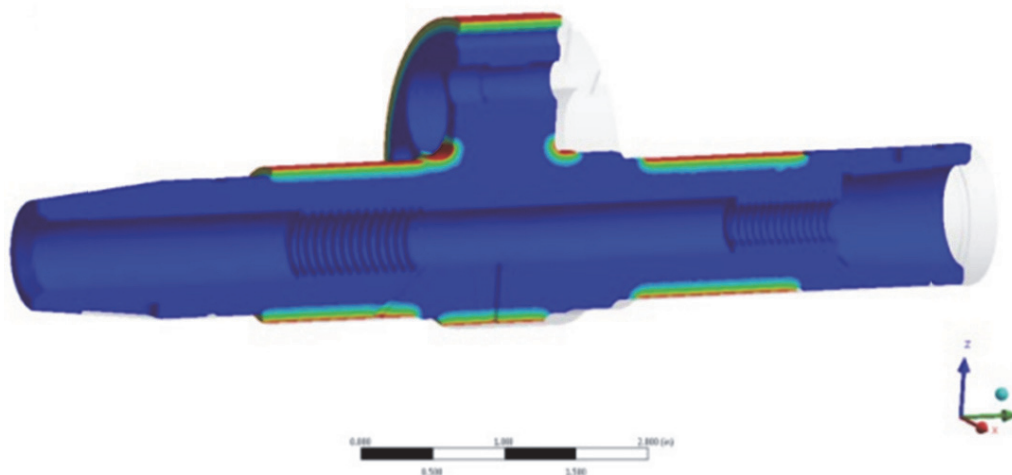


Рис. 4. Моделирование коленчатого вала упрочненного методом ЛУО

коленчатого вала, проводя обработку критических участков, действующих как источники напряжений, а именно отверстий, выступов, скруглений, предварительно промоделировав распределение остаточных напряжений в проблемных местах изделия (рис. 4) [13]. Возникающие после ЛУО ($w=5,7$ ГВт/см²) остаточные напряжения сжатия снижают вероятность зарождения трещины, замедляют скорость ее роста и продлевают срок службы компонентов. Таким же образом для достижения повышенной усталостной прочности и коррозионной стойкости можно обрабатывать большинство деталей, ослабленных концентраторами напряжений.

ЛУО также используется для упрочнения сварного шва при соединении деталей из конструкционной стали, тем самым увеличивая срок его службы.

Достаточно часто неравномерность микроструктуры и остаточных напряжений в сварном соединении делают его восприимчивым к воздействию повышенных температур и агрессивных сред. В этих условиях ЛУО позволяет повысить прочность сварного соединения, сбалансировать остаточные напряжения в рабочей зоне, способствует измельчению зерна. Анализ сварного соединения двух листов из мартенситной стали показывает [14], что ЛУО ($w \approx 10$ ГВт/см²) приводит к повышению однородности микроструктуры сварного шва, при этом размер зерен уменьшается почти на 17 % в сварном шве и на 24 % в основном металле. Изменение размера зерен в зоне термического влияния наиболее существенно, оно составляет почти 45 % и значительно улучшает механические свойства сварного соединения. ЛУО оказывает существенное влияние на напряженное состояние сварного соединения [14]. Остаточные напряжения сжатия по осевой линии сварного шва увеличиваются почти втрое по сравнению с первоначальным значением от минус 63 МПа до минус 183 МПа

для сварного шва в нормальном направлении, что непосредственно улучшает качество сварного соединения. Таким образом, ЛУО после сварки – это удобный способ изменить микроструктуру и сбалансировать остаточное напряжение.

ЛУО может быть так же использована при упрочнении поверхности труб из нержавеющей стали и устранении уже имеющихся разрушений от коррозионного воздействия. Так, например, в результате гибридной обработки поверхности, включающей восстановление поврежденного участка изделия наплавкой и ЛУО нержавеющей стали 304L (российский аналог 03X18H11), продемонстрировано устранение повреждений, вызванных коррозией [15]. Кроме того, показано, что ЛУО не приводит к существенному изменению шероховатости поверхности по сравнению с дробеструйной обработкой, что является одной из основных особенностей данного процесса [16].

ВЫВОДЫ

Приведенные примеры убедительно демонстрируют, что лазерное ударное упрочнение широко используется во многих отраслях машиностроения с целью создания в поверхностном слое деталей поля остаточных напряжений сжатия для увеличения сопротивления росту усталостных трещин. Существенную роль оказывает лазерный наклеп на улучшение физико-механических свойств материалов, повышение стойкости изделий к коррозии и механическому износу при контактной усталости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Clauer A.H., Lahrman D.F. Laser shock peening for fatigue resistance // ASME 2000 International Mechanical Engineering Congress and Exposition: November 5-10, 2000, Orlando, Florida, USA: book

- of abstracts. (Proc. of the ASME Materials Division; V.94). P.75. IMECE2000-2681
2. *Chahardehi A., Brennan F.P., Steuwer A.* The effect of residual stresses arising from laser shock peening on fatigue crack growth // *Eng. Fract. Mech.* – 2010. – V.77, Iss.11. – PP.2033-2039.
 3. *Achintha M., Nowell D.* Eigenstrain modelling of residual stresses generated by laser shock peening // *J. Mater. Process. Technol.* – 2011. – V.211, Iss.6. – PP.1091-1101.
 4. Laser peening of dovetail slots by fiber optical and articulate arm beam delivery: patent US 7321105 / A.H. Clauer et al.; assignee LSP Technologies. Appl. No. 10/784,725, filed 20.02.2004; publ. date 22.01.2008
 5. *Tolga Bozdana A.* On the mechanical surface enhancement techniques in aerospace industry – a review of technology // *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.* – 2005. – V.77(4). – PP.279-292. <http://dx.doi.org/10.1108/00022660510606349>
 6. *Kamkarrad H., Narayanswamy S.* FEM of residual stress and surface displacement of a single shot in high repetition laser shock peening on biodegradable magnesium implant / *J. Mech. Sci. Technol.* – 2016. – V.30(7). – PP.3265-3273. doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-016-0635-2>
 7. Laser Peening without Coating as a Surface Enhancement Technology / Y. Sano, K. Akita, K. Masaki et al. // *J. Laser Micro Nanoeng.* – 2006. – V.1(3). – PP.161-166. doi:10.2961/jlmn.2006.03.0002
 8. The effect of rolling contact fatigue properties on 316 stainless steel under laser shock peening // F. Doi, W. Cheng, Yu. Zheng et al. // *Optics & Laser Technology.* – 2021. – V.141. – 107159. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107159>
 9. Effect of laser shock peening on corrosion resistance of 316L stainless steel laser welded joint / D. Liu, Y. Shi, J. Liu, L. Wen // *Surf. Coat. Technol.* – 2019. – V.378. – 124824. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.07.048>
 10. Effect of laser shock peening and carbonitriding on tribological properties of 20Cr2Mn2Mo steel alloy under dry sliding conditions / Yunpeng Ren, Hanyu Wan, Yan Chen, Hao Zhu, Heng Lu, Xudong Ren. // *Surf. Coat. Technol.* – 2021. – V.417. DOI:10.1016/j.surfcoat.2021.127215
 11. Effect of laser shock peening on high cycle fatigue properties of aluminized AISI 321 stainless steel / W. Li, H. Chen, W. Huang et al. // *Int. J. Fatigue.* – 2021. – V.147. – 106180. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106180>
 12. Effect of laser shock peening on bending fatigue performance of AISI 9310 steel spur gear / C. Peng, Yu. Xiao, Y. Wang, W. Guo // *Opt. Laser Technol.* – 2017. – V.94. – PP.15-24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.03.017>
 13. Modern Laser Peening for Material Surface Enhancement / M.A. Kattoura, S.C. Bovid, D.F. Lahrman, and A.H. Clauer // in book: Shot Peening - A Dynamic Application and Its Future; 6th edition, Ch.14. – Publisher: Metal Finishing News, 2021. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/353295685_Modern_Laser_Peening_for_Material_Surface_Enhancement_-_6th_Edition_2021
 14. Effects of LSP on micro-structures and residual stresses in a 4 mm CLAM steel weld joints / X. Chen, Yu. Fang, Zhang et al. // *Fusion Eng. Des.* – 2015. – V.94. – PP.54-60. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.03.019>
 15. Laser Shock Peening and its Applications: A Review / R. Sundar, P. Ganesh, R.K. Gupta et al. // *Lasers Manuf. Mater. Process.* – 2019. – V.6. – PP.424-463. <https://doi.org/10.1007/s40516-019-00098-8>
 16. Prediction and characterization of residual stresses from laser shock peening / R.A. Brockman, W.R. Braisted, S.E. Olson et al. // *Int. J. Fatigue.* – 2012. – V.36, Iss.1. – PP.96-108. doi:10.1016/j.ijfatigue.2011.08.011

POSSIBILITIES OF LASER SHOCK PEENING TO INCREASE THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF PRODUCTS MADE FROM STRUCTURAL STEEL

© 2024 D.D. Fedotov¹, S.I. Yaresko^{1,2}

¹ Samara State Technical University, Samara, Russia

² Samara Branch of P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

The main areas of application of laser shock peening (LSP), schemes for its realization and advantages of the method are considered. Information is provided on the main areas of application of LSP, which include the creation of residual compressive stresses, increasing fatigue strength, increasing corrosion resistance and durability. The capabilities of the LSP method are shown using specific examples from various branches of mechanical engineering. Conclusions about the perspective of using this technology for raising the operational characteristics of mechanical engineering products are made.

Key words: laser shock peening, mechanical engineering, aircraft industry, fatigue strength, compressive stress, corrosion, microstructure

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4(2)-276-280

EDN: JCMWZQ

Denis Fedotov, Postgraduate Student.

E-mail: dnsFdtv62@gmail.com

Sergey Yaresko, Doctor of Technical Sciences, Head of the Laboratory of Laser-Induced Processes.

E-mail: yarsi54@gmail.com