

УДК 681.7.055.34

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ЛАЗЕРНОЙ НАНОСТРУКТУРНОЙ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПОДВЕРГНУТЫХ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

© В. П. Бессмельцев¹, С. Г. Баев¹, Н. В. Голошевский¹,
А. В. Лукьянов², М. Д. Жумадилов²

¹Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

²ООО «АГФЗ»,
656002, г. Барнаул, просп. Калинина, 15, корп. 7
E-mail: nickolayg@iae.nsk.su

Рассмотрен метод наноструктурной модификации поверхности металлических образцов, предварительно подвергнутых термической обработке, с помощью фемтосекундного лазерного излучения. Приведены результаты экспериментов по исследованию процесса и определению технологических режимов микрообработки образцов — поверхностного упрочнения и лазерного шлифования. Показаны увеличение поверхностной микротвёрдости для закалённых заготовок из инструментальных сталей и последующее уменьшение шероховатости без потери твёрдости.

Ключевые слова: фемтосекундная лазерная микрообработка, гальванометрические дефлекторы, комплементарные системы сканирования, лазерное упрочнение и шлифование.

DOI: 10.15372/AUT20250109

EDN: DLFYVR

Введение. Задачи изготовления деталей с улучшенными механическими свойствами в области машиностроения и приборостроения требуют новых эффективных способов обработки различных материалов с целью модификации их механических свойств: увеличения сопротивляемости металла к образованию трещин, повышенной износостойкости, коррозионной стойкости, достигающихся в том числе в результате упрочнения поверхностного слоя. Одним из таких способов упрочнения поверхностных слоёв материалов является технология обработки поверхности ультракороткими лазерными импульсами — технология лазерного пининга (laser peening process). Физическая основа лазерного пининга — генерация ударной волны в мишени металла за счёт образования на его поверхности плазмы. Актуальные теоретические и практические результаты процесса подробно представлены в научной литературе [1, 2]. Для лазерных импульсов наносекундного диапазона при интенсивностях, превышающих 10^{10} Вт/см², ударная волна генерируется в результате образования и взрывного расширения плазмы. В итоге прохождения ударной волны в поверхностном слое возникают пластические деформации, наличие которых приводит к упрочнению поверхностного слоя металла с образованием остаточных напряжений. В работе [3] представлены результаты микроструктурных и механических свойств металлических плёнок, обработанных наносекундными лазерными импульсами, согласно которой значительное увеличение прочности связано с уменьшением размера зерна и образованием большой плотности дислокаций, сформированных в результате прохождения ударной волны. Показано, что прочность растёт с увеличением интенсивности лазерного излучения [4]. В [5–7] исследованы модифицированные механические свойства ферритной нержавеющей

стали SUS430 и медных образцов. Во всех случаях обработка поверхности металлов с помощью технологии с использованием наносекундных лазерных импульсов способствует увеличению их поверхностной прочности. Данный метод является одним из ключевых при производстве авиационных двигателей с целью повышения их срока эксплуатации [8].

Несмотря на значительные достижения в области поверхностного упрочнения металлов с помощью наносекундных лазерных импульсов, в данный момент идёт активное исследование механических свойств материалов, обработанных фемтосекундными лазерными импульсами. Интерес к использованию фемтосекундных лазерных импульсов для поверхностного упрочнения связан с их успешным применением в прецизионной микрообработке различных материалов и огромным потенциалом в области достижения больших пиковых интенсивностей.

В результате многоимпульсного облучения фемтосекундными лазерными импульсами (800 нм, 130 фс, 0,2 мДж, диаметр пучка ~ 50 мкм) кристаллической мишени из железа с размером зерна 140 мкм обнаружено образование нанокристаллических структур с большой плотностью дислокаций, которые ранее при использовании традиционных процессов обработки ударными волнами не наблюдались [9]. Зёрна размером от нескольких десятков до сотен нанометров с различной ориентацией обнаружены в пределах 2 мкм от поверхности. Значение микротвёрдости растёт по мере приближения к поверхности и достигает максимального значения в 4,3 ГПа на глубине 0,92 мкм, что в 2,6 раза больше твёрдости немодифицированной матрицы образца.

В работе [10] показано, что в результате взаимодействия одиночных фемтосекундных лазерных импульсов (800 нм, 130 фс, 130 Дж/см²) с поверхностью железной мишени формирующаяся ультракороткая ударная волна приводит к образованию дислокационной структуры, отличной от той, что возникает при воздействии наносекундных лазерных импульсов. Воздействие ультракороткой ударной волны приводит к значительному увеличению плотности дислокаций, изменяющейся по глубине. Согласно интерферометрическим измерениям в различных металлических плёнках, длительность фронта ударной волны составляет 6,25 пс, пластическая волна со сжимающим напряжением в 27,5 ГПа за фронтом упругого предвестника в железной плёнке толщиной 250 нм достигается при плотности энергии 3 Дж/см² [11, 12]. Микроструктура модифицированного материала в виде тонкой пластинки толщиной ~ 100 нм, вырезаемой из исследуемого кратера ионным пучком, исследована с помощью просвечивающего электронного микроскопа. При данных параметрах лазерного излучения глубина модификации составила ~ 4 мкм. На глубине 4 мкм обнаружены периодические структуры в виде микролент.

Таким образом, многочисленные работы в данном направлении свидетельствуют об активном развитии технологий упрочнения поверхностных слоёв материалов с помощью лазерных импульсов. Однако при попытке решения задачи дополнительного упрочнения изделий, предварительно подвергнутых термическому упрочнению, при воздействии лазерного излучения возникает обратный процесс — термический отпуск металла.

Цель представленной работы — разработка методов поверхностного упрочнения и лазерного шлифования поверхности без потери твёрдости закалённых заготовок из инструментальных сталей с помощью фемтосекундного лазерного излучения.

Исследование режимов и определение параметров поверхностного упрочнения. Эксперименты выполнялись с использованием лазерной системы микрообработки с комплементарной системой сканирования, разработанной в Институте автоматики и электрометрии (ИАиЭ) СО РАН [13, 14]. В качестве источника лазерного излучения применялся фемтосекундный волоконный лазер ANTAUS-10W-20 [15] со следующими характеристиками: средняя выходная мощность до 10 Вт, энергия в импульсе до 20 мкДж, частота следования импульсов до 1 МГц. Для исключения влияния окисления в процессе



Рис. 1. Образец из стали 38ХНЗМФА с номерами обрабатываемых исследуемых образцов

обработки экспонирование проводилось с поддувом чистого сухого азота в зону экспонирования.

Для проведения экспериментов использованы образцы из нескольких марок инструментальной стали: 38ХНЗМФА, Р6М5, S600, 20ХГНМ.

Поверхность образцов, предварительно закалённая при термической обработке, подвергалась лазерной обработке импульсами фемтосекундной длительности. Последовательно менялись параметры экспонирования, средняя мощность излучения, частота следования импульсов, размер лазерного пучка в плоскости обработки, траектория его движения, и оценивались следующие параметры эффективности воздействия: уменьшение/увеличение твёрдости поверхностного слоя по отношению к исходной, достижение максимально возможных значений модуля упругости (модуля Юнга) поверхностного слоя и по глубине, определение затрат времени режимов лазерной модификации в пересчёте на 1 см^2 поверхности образца. Для оценки механических характеристик использовался метод инструментального индентирования, в качестве инструмента применялся нанотвердомер НаноСкан-4D (ТИСНУМ, Россия), предназначенный для измерений твёрдости материалов по шкалам индентирования, модуля упругости и ещё ряда параметров, в том числе описанных в [16].

Режим экспонирования представляет собой запись на поверхности образцов растровых полей размером $6 \times 6 \text{ мм}^2$, экспозиция изменялась заданием шага раstra линейного сканирования. Обработка участков поверхности образцов производилась методом селективного лазерного растрового сканирования сфокусированным излучением с фемтосекундной длительностью (214 фс) на длине волны 1030 нм. Лучевая нагрузка и, соответственно, степень воздействия на поверхность образцов варьировались в экспериментах при изменении средней мощности лазерного излучения в диапазоне 100–1000 мВт; частота следования лазерных импульсов составляла от 100 до 500 кГц; скорость сканирования — от 200 до 700 мм/с; размер сфокусированного пучка лазера в плоскости обработки — от 10 до 20 мкм по уровню интенсивности е^{-2} ; расстояние между линиями сканирования (растр) 2–10 мкм.

На образцах стали 38ХНЗМФА на первом этапе определены режимы экспонирования, не приводящего к уменьшению параметров микротвёрдости, затем осуществлён поиск и определены параметры экспонирования, в результате которого происходит увеличение микротвёрдости. На рис. 1 показано изображение образца из стали 38ХНЗМФА, где номерами обозначены зоны обработки (зона 0 — зона без обработки).

Для обработки данного образца использовались следующие параметры экспонирования: мощность лазерного излучения 500 мВт; частота следования импульсов 100 кГц; размер сфокусированного пучка 10 мкм; расстояние между линиями раstra менялось от 2 до 10 мкм (зоны 1–5 соответственно). При данных параметрах экспонирования средняя экс-

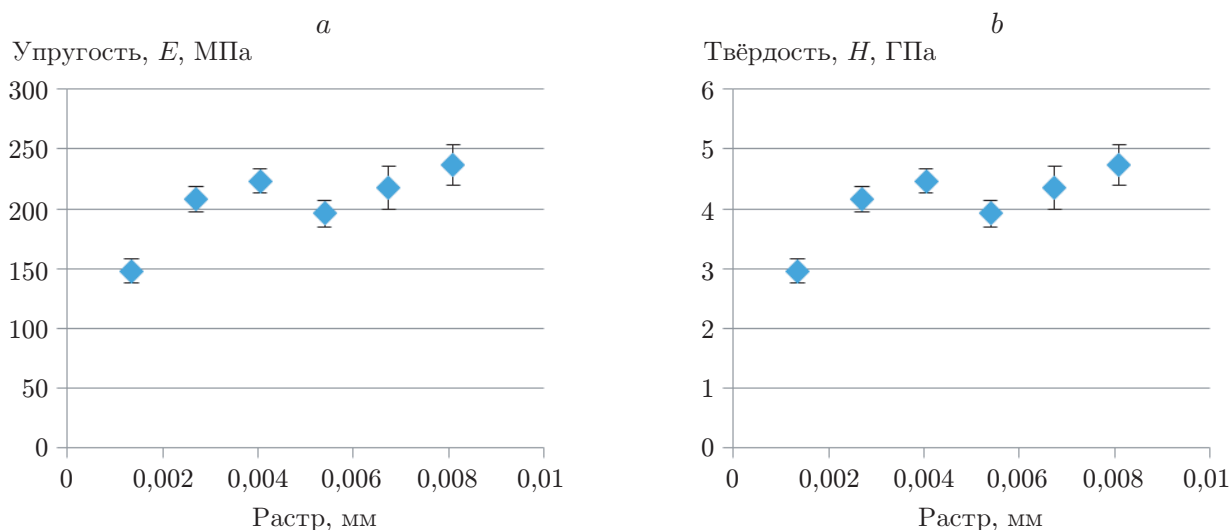


Рис. 2. Зависимость параметров микротвёрдости от величины растра экспонирования

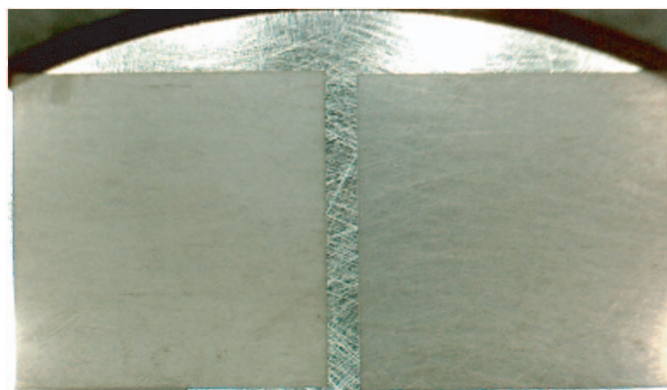


Рис. 3. Результаты лазерной шлифовки образца из стали P6M5

позиция изменяется в диапазоне 4–10 Дж/см². Результаты измерения параметров модуля упругости и микротвёрдости при средней мощности 500 мВт представлены на рис. 2, а, b соответственно.

При найденных параметрах для стали 38ХНЗМФА с увеличением размера растра и, соответственно, уменьшением величины экспозиции величина твёрдости и модуля упругости значительно возрастает. Для других марок стали режим, при котором бы микротвёрдость существенно увеличилась, найден не был.

Исследование режимов лазерной микрообработки, приводящей к уменьшению шероховатости (шлифование) в режиме абляции. Целью экспериментов являлось определение режимов воздействия, в результате которого глубина гравирования (абляции) находилась в диапазоне 0,5–1 мкм. Эксперименты проводились с использованием лазерной системы микрообработки по схеме, аналогичной вышеописанной. Для экспериментов применялись следующие образцы инструментальных сталей, подвергнутые термообработке: P6M5, S600, 20ХГНМ.

Сравнение шероховатости до и после обработки выполнялось с помощью конфокального профилометра, разработанного в ИАиЭ СО РАН [17].



Рис. 4. Профилограмма поверхности образца из стали Р6М5 до обработки. Длина профиля 333 мкм, ширина 36,91 мкм, среднеквадратичное отклонение 0,052 мкм, разность глубин 0,123 мкм



Рис. 5. Профилограмма поверхности образца из стали Р6М5 после обработки. Длина профиля 270 мкм, ширина 36,91 мкм, среднеквадратичное отклонение 0,031 мкм, разность глубин 0,032 мкм

На рис. 3 представлены результаты эксперимента по лазерной шлифовке образца стали Р6М5 при средней мощности излучения 400 и 800 мВт. Параметры экспонирования образца: размер лазерного пучка в плоскости обработки 20 мкм, частота следования импульсов 500 кГц, выходная мощность 400 и 800 мВт соответственно, скорость сканирования 0,99 м/с. В результате глубина обработки составила 1,0 мкм при мощности 800 мВт и 0,6 мкм при мощности 400 мВт.

На рис. 4 и 5 изображены профилограммы поверхности образца до и после шлифования. После лазерной микрообработки наблюдается уменьшение значения шероховатости до 4 раз. Таким образом, установлены итоговые режимы абляции, уменьшающие исходную шероховатость образца (режим шлифовки) и не приводящие к снижению твёрдости.

Заключение. Проведённые исследования показали перспективность методов лазерной фемтосекундной микрообработки стальных изделий из материалов, применяющихся в российской промышленности, для увеличения твёрдости и уменьшения шероховатости их поверхностных слоёв.

Найдены режимы обработки, позволяющие двукратно увеличить микротвёрдость поверхностного слоя для образца из закалённой стали 38ХНЗМФА. Для стали Р6М5 установлены режимы обработки, уменьшающие исходную шероховатость образца до 4 раз и не приводящие к снижению твёрдости.

На основе полученных данных планируется провести обработку высоконагруженных деталей топливной аппаратуры дизельных двигателей и их испытания в составе действующих агрегатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hackel L., Rankin J. R., Rubenchik A. et al. Laser Peening: A Tool for Additive Manufacturing Post-processing // Additive Manufacturing. 2018. **24**. P. 67–75.
2. Иногамов Н. А., Перов Е. А., Жаховский В. В. и др. Лазерная ударная волна: пластичность, толщина слоя остаточных деформаций и переход из упругопластического в упругий режим распространения // Письма в ЖЭТФ. 2022. **115**, вып. 2. С. 80–88.

3. **Cheng G. J., Pirzada D., Ming Z.** Microstructure and mechanical property characterizations of metal foil after microscale laser dynamic forming // *Journ. Appl. Phys.* 2007. **101**, Iss. 6. 063108.
4. **Gao H., Cheng G. J.** Laser-Induced High-Strain-Rate Superplastic 3-D Microforming of Metallic Thin Films // *Journ. Microelectromechanical Systems*. 2010. **19**, Iss. 2. P. 273–281.
5. **Zhou J. Z., Yang J. C., Zhang Y. K., Zhou M.** A study on super-speed forming of metal sheet by laser shock waves // *Journ. Mater. Processing Technol.* 2002. **129**, Iss. 1–3. P. 241–244.
6. **Zhou M., Zhang Y. K., Cai L.** Ultrahigh-strain-rate plastic deformation of a stainless-steel sheet with TiN coatings driven by laser shock waves // *Appl. Phys. A*. 2003. **77**. P. 549–554.
7. **Zheng C., Sun S., Ji Z., Wang W.** Effect of laser energy on the deformation behavior in microscale laser bulge forming // *Appl. Surf. Sci.* 2010. **257**, Iss. 5. P. 1589–1595.
8. **Ocaña J. L., Morales M., Molpeceres C., Porro J. A.** A review of the physics and technological issues of high intensity laser shock processing of materials as a method for mechanical properties modification // *Proc. SPIE*. 2006. **6346**. 63461P.
9. **Matsuda T., Sano T., Arakawa K., Hirose A.** Multiple-shocks induced nanocrystallization in iron // *Appl. Phys. Lett.* 2014. **105**, Iss. 2. 021902.
10. **Matsuda T., Sano T., Arakawa K., Hirose A.** Dislocation structure produced by an ultrashort shock pulse // *Journ. Appl. Phys.* 2014. **116**, Iss. 18. 183506.
11. **Meyers M. A., Jarmakani H., Bringa E. M., Remington B. A.** Dislocations in Shock Compression and Release / Eds. by J. P. Hirth, L. Kubin // *Dislocations in Solids*. North—Holland: Elsevier, 2009. Vol. 15, ch. 89. P. 91–198.
12. **Demaske B. J., Zhakhovsky V. V., Inogamov N. A., Oleynik I. I.** Ultrashort shock waves in nickel induced by femtosecond laser pulses // *Phys. Rev. B*. 2013. **87**. 054109.
13. **Bulushev E., Bessmeltsev V., Dostovalov A. et al.** High-speed and crack-free direct-writing of microchannels on glass by an IR femtosecond laser // *Opt. and Lasers in Eng.* 2016. **79**. P. 39–47.
14. **Bessmeltsev V., Katasonov D., Goloshevsky N., Baev S.** Method of Forming Microchannels on the Surface of a Glass Substrate // *Mater. Sci. Forum*. 2021. **1031**. P. 141–146.
15. **ANTAUS.** Иттербиевый фемтосекундный волоконный лазер. URL: <https://avesta.ru/product/antaus-itterbievyj-femtosekundnyj-volokonnyj-lazer/> (дата обращения: 10.10.2024).
16. **ГОСТ Р 8.748-2011.** Государственная система обеспечения единства измерений. Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Ч. 1. Метод испытаний. М.: Стандартиформ, 2013. 23 с.
17. **Булусhev Е. Д.** Разработка алгоритмов и программных средств для определения оптимальных параметров лазерной микрообработки по данным систем технического зрения и оптических профилометров: Дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2015. 140 с.

Поступила в редакцию 15.10.2024

После доработки 30.10.2024

Принята к публикации 07.11.2024