

УДК 621.789

Лазерное термоупрочнение нежестких валов насосных агрегатов

Локтев Александр Сергеевич^{1,2}loktev @laser33.ru
ORCID: 0009-0004-5978-2219Печников Илья Сергеевич^{1,2}pechnikov@laser33.ru
ORCID: 0009-0003-6727-8525¹ Владимирский государственный университет имени А.Г и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия² ООО «ИЦ при ВлГУ», Владимир, Россия

Аннотация. Статья посвящена актуальной проблеме повышения поверхностной твердости ступенчатых валов — важных элементов машиностроения, применяемых в различных отраслях промышленности. Лазерное термоупрочнение (ЛТУ) рассмотрено как один из эффективных методов улучшения их эксплуатационных характеристик. Проведены экспериментальные исследования на образцах-имитаторах из коррозионностойкой жаропрочной стали 14X17H2 и реальных ступенчатых валах из конструкционной легированной стали 40X. Установлена взаимосвязь между мощностью лазерного излучения и радиальным биением. Также выявлена зависимость показателей упрочненного слоя от критерия Фурье. Определена температура в зоне воздействия лазерного излучения (~1000 °C), соответствующая оптимальной температуре закалки стали 14X17H2 без риска оплавления. Полученные данные могут быть использованы для совершенствования технологий термоупрочнения валов в машиностроении.

Ключевые слова: лазерное термоупрочнение, радиальное биение, ступенчатый вал, сталь 14X17H2, сталь 40X, упрочненный слой, температура в зоне ЛТУ

Laser thermal hardening of non - rigid shafts of pumping units

Loktev Alexander Sergeevich^{1,2}loktev @laser33.ru
ORCID: 0009-0004-5978-2219Pechnikov Ilya Sergeevich¹pechnikov@laser33.ru
ORCID: 0009-0003-6727-8525¹ Vladimir State University, Vladimir, Russia² Engineering Center at Vladimir State University, Vladimir, Russia

Abstract. This article addresses the current challenge of enhancing the surface hardness of stepped shafts, which are critical components in mechanical engineering across various industries. Laser surface hardening (LSH) is explored as an effective method for improving their operational characteristics. Experimental studies were conducted on surrogate samples made of corrosion-resistant heat-resistant 14Kh17N2 steel and actual stepped shafts made of structural alloy steel 40Kh. The study establishes a correlation between the laser power and radial runout. Furthermore, a dependence of the hardened layer properties on the Fourier criterion was revealed. The temperature in the laser irradiation zone (~1000°C), corresponding to the optimal quenching temperature for 14Kh17N2 steel with-

out the risk of melting, was determined. The data obtained can be used to improve shaft surface hardening technologies in mechanical engineering.

Keywords: *laser surface hardening, radial runout, stepped shaft, 14Kh17N2 steel, 40X steel, Fourier criterion, hardened layer, temperature in the LSH zone*

Введение. Повышение поверхностной твердости валов посредством лазерного термоупрочнения (ЛТУ) является актуальной задачей, решаемой за счет локального нагрева и последующего быстрого охлаждения [1–4]. Технология ЛТУ характеризуется существенными преимуществами [5–9], однако ее широкое внедрение сдерживается проблемой увеличения радиального биения валов, что обуславливает необходимость оптимизации технологических режимов и разработки методов контроля деформаций. Оптимальная скорость лазерной обработки достигается путем баланса времени нагрева и охлаждения материала; отклонение от оптимального режима приводит к неполному мартенситному превращению (при высокой скорости) или к чрезмерным термическим деформациям (при низкой скорости) [4, 10–12]. В рамках настоящего исследования предпринята попытка установить взаимосвязь между параметрами технологического режима ЛТУ, показателями упрочненного слоя и радиальным биением ступенчатых валов из стали 14X17H2 с целью разработки эффективных методов снижения радиального биения и расширения области применения технологии ЛТУ.

Методы исследования. Экспериментальные работы проводились с целью установления оптимальных параметров технологического режима лазерного термоупрочнения (ЛТУ) и оценки влияния различных факторов на качество упрочненного поверхностного слоя и радиальное биение ступенчатых валов. Исследования были разделены на два основных этапа, включающих использование образцов-имитаторов и реальных ступенчатых валов из различных сталей.

Для проведения исследований был задействован лазерный роботизированный комплекс (ЛРК), обеспечивающий точное позиционирование и обработку деталей. Комплекс включал следующие основные компоненты:

- шестиосевой промышленный робот-манипулятор FANUC M710iC/50;
- двухосевой позиционер FANUC 2-axis;
- иттербиевый волоконный лазер IPG LS-5 (длина волны 1070 нм, максимальная мощность 5 кВт, диаметр волокна 100 мкм);
- фокусирующая оптическая головка IPG FLW D50 с фокусным расстоянием 250 мм.

Для обеспечения надежного закрепления, вращения и защиты обрабатываемых деталей применялись:

- специальные опоры с полиуретановыми роликами, позволяющие поддерживать и вращать валы;
- эластичная муфта, компенсирующая эксцентриситет осей вращения и предотвращающая повреждение обрабатываемой поверхности;
- металлические заглушки для защиты шпоночных пазов от воздействия лазерного излучения.

Исследуемые материалы и образцы:

– образцы-имитаторы: гладкие валы диаметром 150 мм и длиной 400 мм из коррозионностойкой жаропрочной стали 14X17H2;

– ступенчатые валы: валы типоразмеров № 1-1 и № 1-2 из конструкционной легированной стали 40X, имеющие диаметры шеек от 80 до 180 мм и длину от 3100 до 3400 мм.

Перед проведением обработки поверхность валов проходила обязательную подготовку, включающую обезжиривание и установку защитных заглушек в шпоночные пазы для предотвращения нежелательного воздействия на них лазерного излучения.

Материалы и методы. Для определения влияния мощности ЛИ на радиальное биение (сталь 40X) были обработаны две пары ступенчатых валов (типоразмеров № 1-1 и № 1-2) в различных технологических режимах. Мощность лазерного излучения P варьировалась в диапазоне от 78 до 82 % от максимально используемой во время ЛТУ, при частоте вращения поворотного устройства от 2,8 до 5,5 об/мин (в зависимости от диаметра обрабатываемой шейки). Тип рисунка упрочнения представлял собой кольцевые полосы с коэффициентом перекрытия $K_{\pi} = 0,38$.

Определение влияния параметров ЛТУ на свойства упрочненного слоя (сталь 14X17H2) проводилось на образцах-имитаторах и исследовалось влияние следующих параметров технологического режима: мощность лазерного излучения P , скорость перемещения детали относительно лазерного излучения v , диаметр пятна лазерного излучения на обрабатываемой поверхности $d_{\text{л}}$.

Для оценки качества упрочненного поверхностного слоя и геометрических параметров использовались следующие методы и приборы.

Измерение микротвердости производилось с помощью микротвердомера ПМТ-3 в соответствии с ГОСТ 9450–76.

Металлографические исследования проводились с использованием металлографического микроскопа LEICA DM ILM и системы анализа микроструктур AXALIT 1936 для изучения структуры упрочненного слоя.

Измерение радиального биения осуществлялось с помощью цифрового индикатора SHANE GS-5321 с точностью $\leq 1,4$ мкм и разрешением 0,2 мкм, установленного на специальном стенде.

Результаты. Диаграмма (рис. 1) показывает изменение значения максимального радиального биения валов № 1-1, № 1-2 после ЛТУ с мощностью с различной мощностью лазерного излучения в сравнении с закалкой ТВЧ.

На рис. 2–4 представлены зависимости твердости и глубины упрочненного слоя стали 14X17H2 от критерия Фурье при мощностях лазерного излучения 100 и 32 %.

На рис. 5 представлена зависимость твердости упрочненного слоя на глубинах от 0,2 до 1,0 мм стали 14X17H2 от относительной плотности мощности при одинаковой скорости обработки.

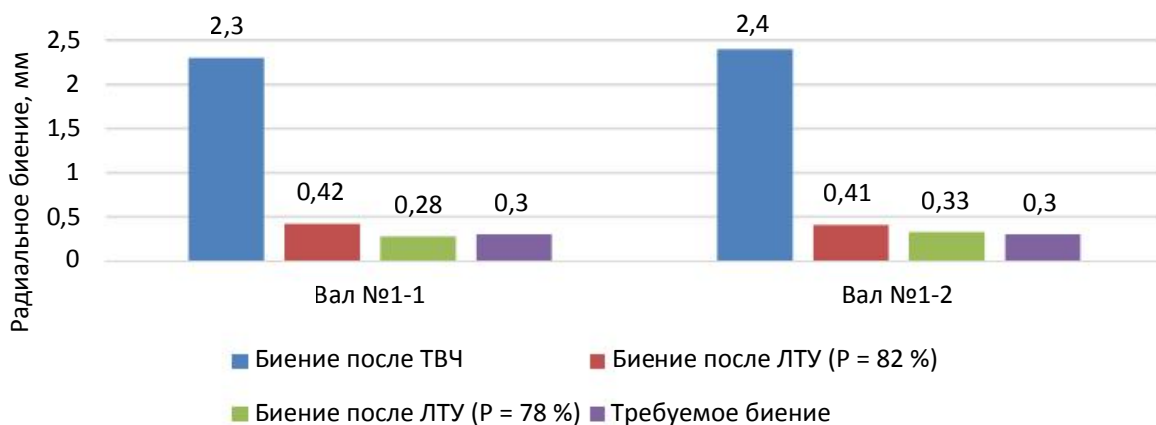


Рис. 1. Диаграмма зависимости максимального радиального биения валов из стали 40X от мощности лазерного излучения

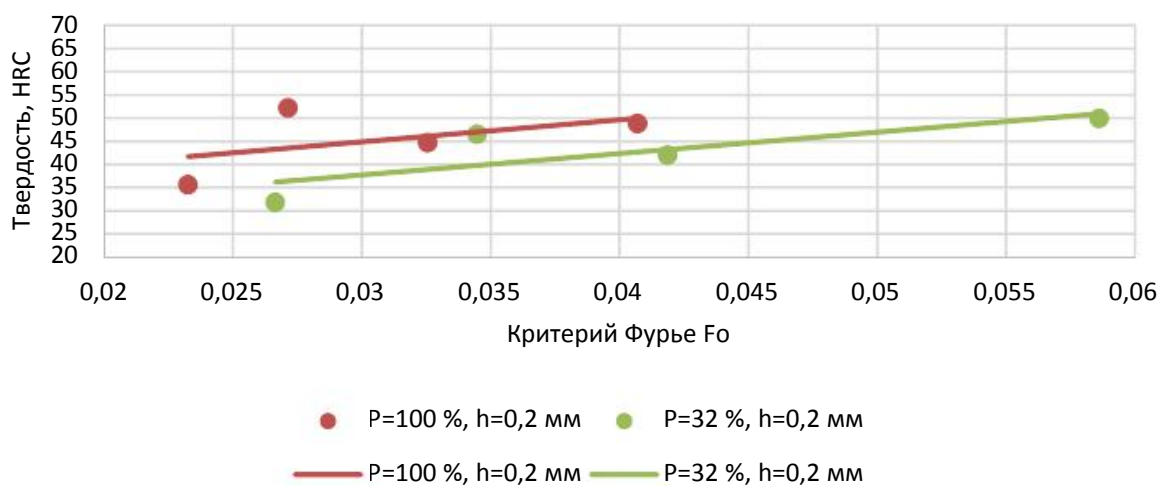


Рис. 2. График зависимости твердости стали 14X17H2 после ЛТУ на глубине 0,2 мм от критерия Фурье

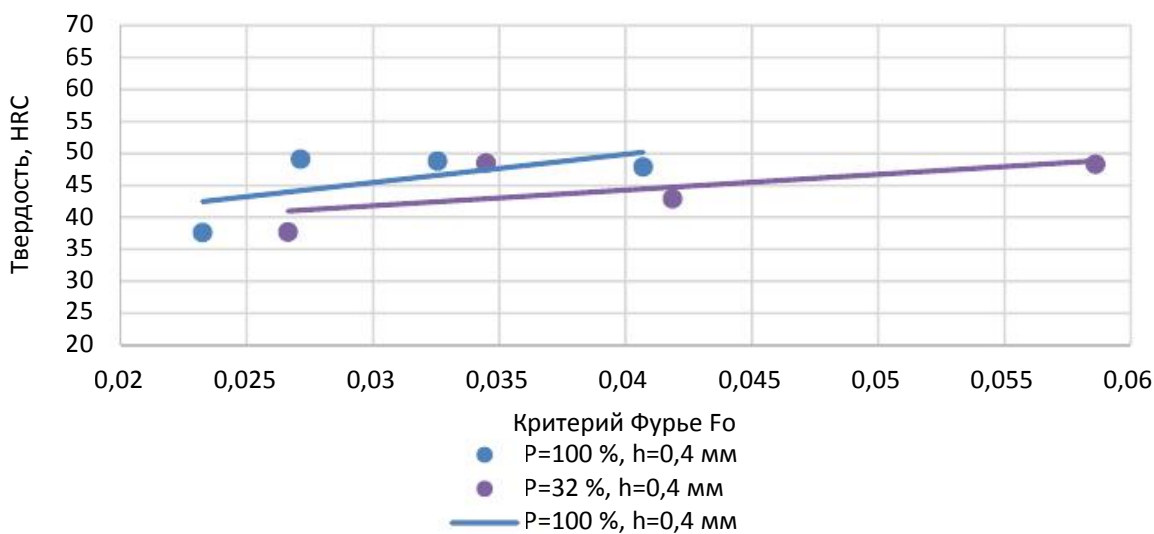


Рис. 3. График зависимости твердости стали 14X17H2 после ЛТУ на глубине 0,4 мм от критерия Фурье

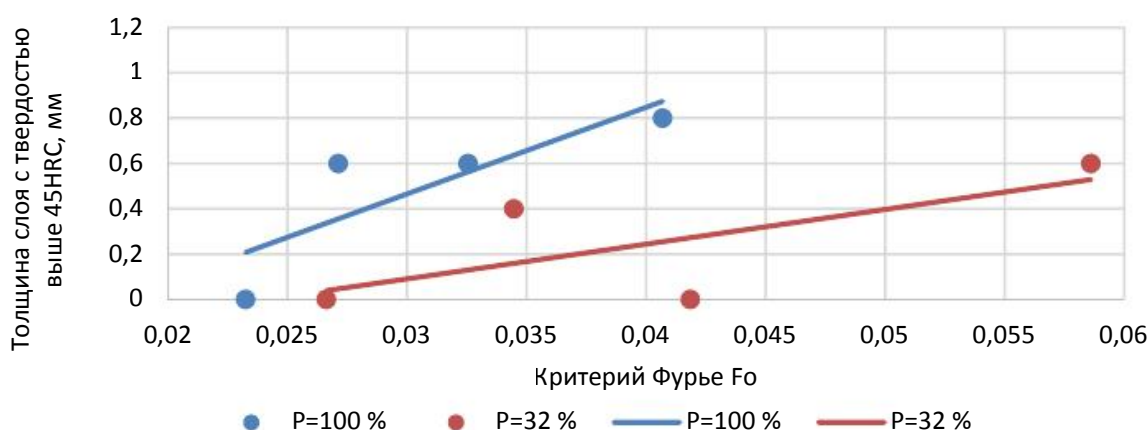


Рис. 4. График зависимости толщины закаленного слоя стали 14X17H2 от критерия Фурье

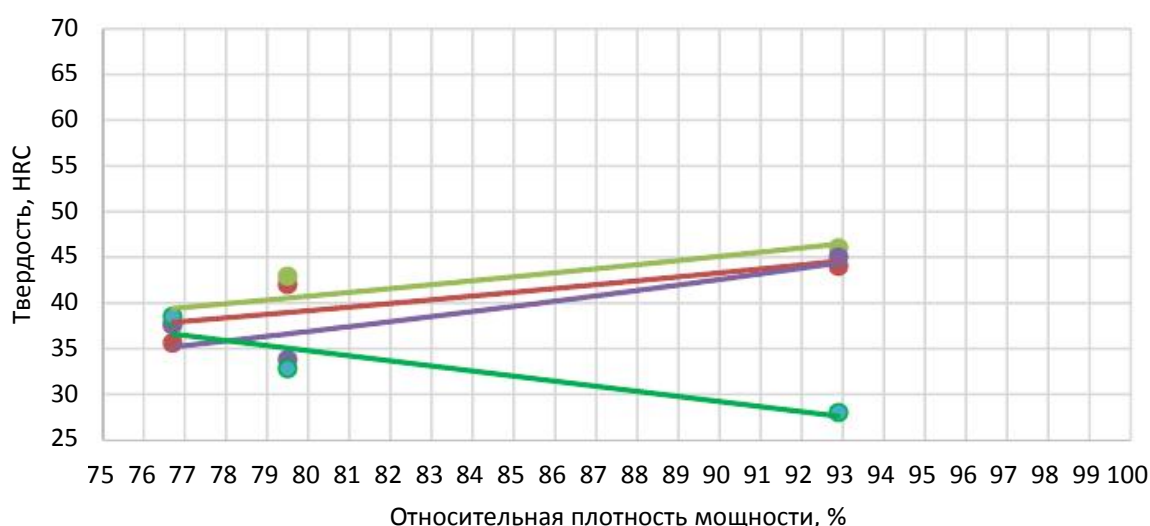


Рис. 5. График зависимости твердости закаленного слоя стали 14X17H2 от плотности мощности на различной глубине h

Обсуждение полученных результатов. Полученные экспериментальные данные подтверждают влияние мощности лазерного излучения (ЛИ) на величину радиального биения ступенчатых валов в процессе термоупрочнения. Установлена обратная зависимость между мощностью ЛИ и радиальным биением: снижение мощности приводит к уменьшению тепловложения в материал, что способствует снижению деформаций. В частности, уменьшение мощности ЛИ с 82 до 78 % от максимального значения приводит к снижению радиального биения в среднем на 26 %. Однако следует отметить, что чрезмерное снижение мощности ЛИ может негативно сказаться на глубине упрочненного слоя. Данный эффект подтверждается результатами предыдущих исследований [4, 11–13], что указывает на необходимость поиска оптимального баланса между минимизацией деформаций и обеспечением требуемых характеристик упрочненного слоя.

Исследования технологических режимов ЛТУ, проведенные на образцах-имитаторах из стали 14X17H2, демонстрируют, что уменьшение мощности

ЛИ и критерия Фурье приводит к закономерному снижению показателей упрочненного слоя. Кроме того, зафиксировано явление оплавления поверхности при критерии Фурье, равном 0,027 и более, и максимальной мощности ЛИ (100 %), что указывает на достижение температуры плавления в зоне термического воздействия.

Заключение. В результате проведенных экспериментальных исследований лазерного термоупрочнения (ЛТУ) ступенчатых валов из стали 40X и образцов-имитаторов из стали 14X17H2 установлено следующее.

Экспериментально подтверждена тенденция к снижению радиального биения валов с уменьшением мощности лазерного излучения, что обусловлено уменьшением тепловложения в материал и снижением термических деформаций.

Выявлена количественная взаимосвязь между характеристиками упрочненного поверхностного слоя, формирующегося в процессе ЛТУ, и критерием Фурье, позволяющая прогнозировать свойства упрочненного слоя на основе параметров технологического режима.

Показано, что уменьшение критерия Фурье, характеризующего скорость охлаждения при ЛТУ, приводит к снижению показателей упрочненного слоя.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0020, госзадание ВлГУ).

Список источников

- [1] Локтев А.С., Печников И.С. Исследование влияния лазерного термоупрочнения на износостойкость контактных поверхностей распределительных валов. *Инновации. Технологии. Производство. IX Междунар. технол. форум: матер.* Рыбинск, РГАТУ им. П.А. Соловьева, 2023, № 2 (65), с. 90–96.
- [2] Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. *Технологические процессы лазерной обработки.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, 664 с.
- [3] Ежова Г.П. Лазерная обработка. *Инновационные научные исследования в современном мире. XII Междунар. науч.-практ. конф.: матер.* Уфа, Научно-издательский центр «Вестник науки», 2023, ч. 1, с. 86–90.
- [4] Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н. *Методы поверхностной лазерной обработки.* Москва, Директ-Медиа, 2021, 191 с.
- [5] Павлов Е.В. Повышение износостойкости и контактной долговечности коленчатых валов. *Известия Юго-Западного государственного университета*, 2013, № 1, с. 28–31.
- [6] Фазулзянов М.Р., Русинов В.Д., Нугуманова Э.И., Шивоев Р.С. Методы поверхностного упрочнения деталей машин на примере коленчатого вала. *Современные наука и образование: достижения и перспективы развития*, 2023, с. 100–111.
- [7] Майсурадзе М.В., Рыжков М.А., Корниенко О.Ю., Степанов С.И. *Индукционная и лазерная термическая обработка стальных изделий.* Екатеринбург, Изд-во Уральского университета, 2022, 92 с.
- [8] Lach L. Recent advances in laser surface hardening: techniques, modeling approaches, and industrial applications. *Crystals*, 2024, no. 8, art. no. 726. <https://doi.org/10.3390/cryst14080726>
- [9] Завитков А.В., Печников И.С. Современные методы восстановления и повышения износостойкости деталей двигателя внутреннего сгорания. *Актуальные проблемы эксплуата-*

- ции автотранспортных средств. XXIII Междунар. науч.-практ. конф.: матер. Владимир, ВГУ им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, 2021, с. 111–115.
- [10] Петроченко С.В. Оценка влияния параметров режима лазерной закалки на качество поверхности и поверхностного слоя деталей станков. *Омский научный вестник*, 2024, № 1 (189), с. 56–65.
- [11] Садовский В.Д. Фазовые и структурные превращения при лазерном нагреве стали. II. Влияние отпуска закаленной стали на процесс перекристаллизации при лазерном нагреве. *Физика металлов и металловедение*, 1984, № 4, с. 812–817.
- [12] Mishchiruk O.M. Influence of laser hardening modes on the properties of 40X13 steel. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, no. 2, pp. 103–112. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-103-112>
- [13] Королев А.В., Мазина А.А., Яковишин А.С., Шалунов А.В., Технологические причины возникновения остаточных напряжений. *Современные материалы, техника и технологии*, 2016, № 5 (8), с. 116–120.