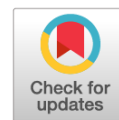


Оригинальное исследование

УДК 621.793

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_237](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_237)

EDN: LRDSXT



# Лазерно-индукционное термоупрочнение жаропрочных сталей

А.Д. Ахметов<sup>1</sup>, И.А. Цибульский<sup>1</sup>, А.О. Сидоренко<sup>1</sup>, В.В. Сомонов<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия;<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Эрозия лопаток паровых турбин в процессе эксплуатации — существенная проблема энергетической отрасли. В настоящее время существуют способы по борьбе с ней, которые, однако, имеют существенные недостатки. Предлагаемая в статье технология лазерно-индукционного термоупрочнения дает возможность, сочетая современные технологические инструменты, нивелировать явление эрозии и существенно увеличить ресурс лопаток турбин.

**Цель работы.** Исследование возможностей лазерного и индукционного источников нагрева, а именно, создание переменного глубокого упрочненного слоя в образцах из лопаточной стали, путем поверхностного термоупрочнения, а также исследования его свойств (структура и твердость, деформации образцов).

**Материалы и методы.** В настоящей статье представлены результаты экспериментальных исследований лазерно-индукционного термоупрочнения плоских образцов из жаропрочных сталей 15X11МФ, 20X13, ЭИ-961. Исследования выполнены в рамках работ по разработке технологии закалки поверхности лопаток паровых турбин из мартенситных сталей для защиты входных кромок от эрозии.

**Результаты.** Получена единая зона упрочнения на входной кромке и примыкающем участке спинки образцов без дефектов в виде микротрещин и несплошностей, без оплавления поверхности. Твердость в границах упрочненного слоя со стороны входной кромки — не менее 400 HV0.5. При этом глубина упрочненного слоя в области входной кромки составляет не менее 5 мм, а на примыкающем участке спинки лопатки — не менее 2 мм. Максимальная деформация образца после термоупрочнения не превышает 1,2 мм.

**Заключение.** По результатам экспериментов лазерно-индукционного термоупрочнения плоских образцов из жаропрочных сталей 15X11МФ, 20X13, ЭИ-961 можно заключить, что данный вид обработки является перспективным для замены традиционных способов термоупрочнения поверхности изделий, выполненных из этих материалов, в борьбе против эрозии.

**Ключевые слова:** лазерно-индукционное термоупрочнение, жаропрочные стали, механические свойства, повышение твердости, закалка, деформации, эрозия.

## Как цитировать

Ахметов А.Д., Цибульский И.А., Сидоренко А.О., Сомонов В.В. Лазерно-индукционное термоупрочнение жаропрочных сталей // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 2. С. 237–244. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_02\_237 EDN: LRDSXT

Original study article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_237](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_237)

EDN: LRDSXT

# Laser and Induction Hardening of Refractory Steels

Aleksander D. Akhmetov<sup>1</sup>, Igor A. Tsibulsky<sup>1</sup>, Anton O. Sidorenko<sup>1</sup>, Vladislav V. Somonov<sup>1, 2</sup><sup>1</sup> Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia;<sup>2</sup> National Research University ITMO, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Steam turbine blade erosion during operation is a serious problem in the energy industry. Today, there are methods to prevent it; however, they have significant limitations. The laser and induction hardening technology proposed in the paper allows to mitigate erosion and significantly increase the service life of turbine blades by combining state-of-the-art process tools.

**AIM:** To study the capabilities of laser and induction heat sources, i.e. to create a variable deep-hardened layer in blade steel test pieces by surface hardening, and its properties (structure and hardness, test piece deformations).

**MATERIALS AND METHODS:** This paper presents the experimental studies of laser and induction hardening of flat test pieces made of refractory steels 15H11MF, AISI 420, and EI961. The study was conducted during the development of a hardening technology to treat the surface of steam turbine blades made of martensitic steels to protect their leading edges from erosion.

**RESULTS:** We obtained a single hardening zone on the leading edge and the adjacent section on the back of the test pieces with no defects, i.e. microcracking, discontinuities, and surface glazing. Hardness within the boundaries of the hardened layer on the leading edge side is at least 400 HV0.5. In this case, the hardened layer depth in the area of the leading edge is at least 5 mm and at least 2 mm in the adjacent section of the blade back. The maximum test piece deformation after strengthening is 1.2 mm.

**CONCLUSION:** Experiments on laser and induction hardening of flat test pieces made of refractory steels 15H11MF, AISI 420, EI961 show that this treatment is a promising method to replace conventional surface hardening of products made from these materials to protect them from erosion.

**Keywords:** laser and induction hardening; refractory steels; mechanical properties; hardening; quenching; deformation; erosion.

## To cite this article

Akhmetov AD, Tsibulsky IA, Sidorenko AO, Somonov VV. Laser and Induction Hardening of Refractory Steels. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(2):237–244. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_02\_237 EDN: LRDSXT

Submitted: 04.04.2025

Accepted: 21.04.2025

Published online: 26.06.2025

## ВВЕДЕНИЕ

Лопатка турбины представляет собой металлическую пластину, предназначенную для работы с потоками расширенного газа в турбинной установке. Лопатки преобразуют линейное движение пара высокой температуры и высокого давления, движущегося в сторону снижения давления, во вращательное движение вала турбины.

Детали паровых турбин, работающие во влажном паре, подвергаются непрерывному воздействию капель или струй жидкости, из-за чего может возникать капельная эрозия [1–4]. Капли воды могут ударяться о вращающиеся лопатки последней ступени преимущественно с выпуклой стороны (спинки) лопатки с относительной скоростью до нескольких сотен метров в секунду. Высокая энергия удара капель, особенно на больших лопатках, может привести к повреждению материала, в первую очередь на входных кромках вблизи кончиков лопастей [5, 6]. Для повышения сопротивления эрозии лопаток с низким давлением под воздействием капель воды существует много технологий [7, 8], самая распространенная из них — использование стеллитовых пластинок, которые припаивают к входной кромке. Данная технология имеет ряд недостатков: различие коэффициента линейного расширения напайной пластины и основного металла рабочей лопатки; разброс твердости поверхностного слоя стеллитовых пластин (различие может достигнуть HV 100); изменение аэродинамической формы профиля рабочей лопатки; возможность отрыва стеллитовых пластин целиком; возможный эрозионный износ поверхностей лопаток ниже стеллитовых напаяек и в промежуточных зонах между напайными пластинами; снижение усталостной прочности рабочей лопатки. При нарушении технологии припайки стеллитовых пластин могут появиться локальные прижёги основного материала лопатки, что приводит к его охрупчиванию и повышенной опасности возникновения трещин в месте прижёга. Кроме того, место стыка стеллитовых пластин является своеобразным концентратором напряжений. При эксплуатации турбин в нерасчётных режимах (с малыми объёмными расходами рабочего пара в конденсатор, на ухудшенном вакууме) в них могут появиться трещины, способные в дальнейшем привести к разрушению рабочих лопаток [9]. Там же приведены данные по опыту эксплуатации в 1985–2008 гг. на филиале «Сургутская ГРЭС-2» ОАО «ОГК-4» 6 паровых турбин мощностью по 800 МВт, который свидетельствует о том,

что ко второму капитальному ремонту (при наработке 75–95 тыс. ч и числе пусков 245–308) рабочими лопатками «утрачено» до 50–90 % стеллитовых пластин).

Современным методом упрочнения паровых лопаток является лазерная закалка [10–12]. При лазерной закалке осуществляется нагрев за счет энергии излучения лазера и естественное охлаждение с отводом тепла от нагретой области в деталь за счет классического механизма теплопроводности и в окружающее пространство путем теплового излучения. Данный способ перспективнее, т. к. стабильнее, проще и обеспечивает хорошие результаты в плане повышения стойкости поверхности лопаток к эрозии [13, 14]. В данной работе представлены результаты лазерно-индукционного термоупрочнения на образцах с постоянной и переменной кромками из лопаточной стали 15X11МФ-Ш, 20X13 и ЗИ-961.

## МЕТОДЫ

В качестве источника лазерного излучения использован волоконный лазер ЛС-15 с максимальной выходной мощностью 15 кВт. Внешний вид источника лазерного излучения представлен на рис. 1. Лазерное излучение фокусировалось сварочной головкой ND65 фирмы WSX, оснащенной гальванометром, позволяющим осуществлять поперечные колебания. В качестве второго источника нагрева использовали сверхвысокочастотную (СВЧ) установку СВЧ-6АВ максимальной мощностью 6 кВт. На рис. 1 представлена схема компонентов стенда, на котором были проведены эксперименты по термообработке.

Для экспериментальных исследований лазерно-индукционного термоупрочнения использованы плоские образцы постоянного сечения размерами 460×80×16,5 мм и переменного сечения размерами 450×60/70×16,8 мм из жаропрочных сталей 15X11МФ, 20X13, ЗИ-961 (рис. 2). Химический состав сталей представлен в табл. 1. Целью исследований было получение единой зоны упрочнения на входной кромке и примыкающем участке спинки образцов (рис. 2, с) без дефектов в виде микротрещин и несплошностей, без оплавления поверхности, оценка твердости в границах упрочненного слоя, а также глубины упрочненного слоя в области входной кромки и на примыкающем участке спинки.

Экспериментальные исследования лазерного термоупрочнения осуществляли способом непрерывной обработки зоны упрочнения на входной кромке индуктором

Таблица 1. Химический состав в % материала

Table 1. Chemical composition in % material

	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	V	Cu	W	V
15X11МФ	0,12–0,19	До 0,5	До 0,7	До 0,6	До 0,025	До 0,03	10–11,5	0,6–0,8	0,25–0,4	До 0,3	–	–
20X13	0,16–0,25	До 0,6	До 0,6	До 0,6	До 0,025	До 0,03	12–14	–	–	–	–	–
ЗИ-961	0,1–0,16	До 0,6	До 0,6	1,5–1,8	До 0,03	До 0,03	10,5–12	0,35–0,5	–	–	1,6–2	0,18–0,3

и на примыкающем участке спинки лопатки лазерным излучением, при сканировании лазерного излучения в поперечном направлении, за один проход (рис. 3). В ходе обработки осуществлялось непрерывное перемещение образца относительно стационарных источников нагрева. Для фиксации температуры в зоне нагрева использовали инфракрасную камеру. После лазерной заковки проводилась зачистка обработанных поверхностей абразивной бумагой.

После проведения лазерной термообработки необходимо изготовить шлифы для исследования макро- и микроструктуры образцов на наличие недопустимых дефектов структуры, измерения глубины закаленной зоны, а также измерения твердости. Для изготовления шлифов использовались: электроэрозионный отрезной станок ProTech DK-7755, модульный пресс для горячей запрессовки образцов ATM OPAL X-PRESS, шлифовально-полировальный станок ATM SAPHIR 250 ECO.

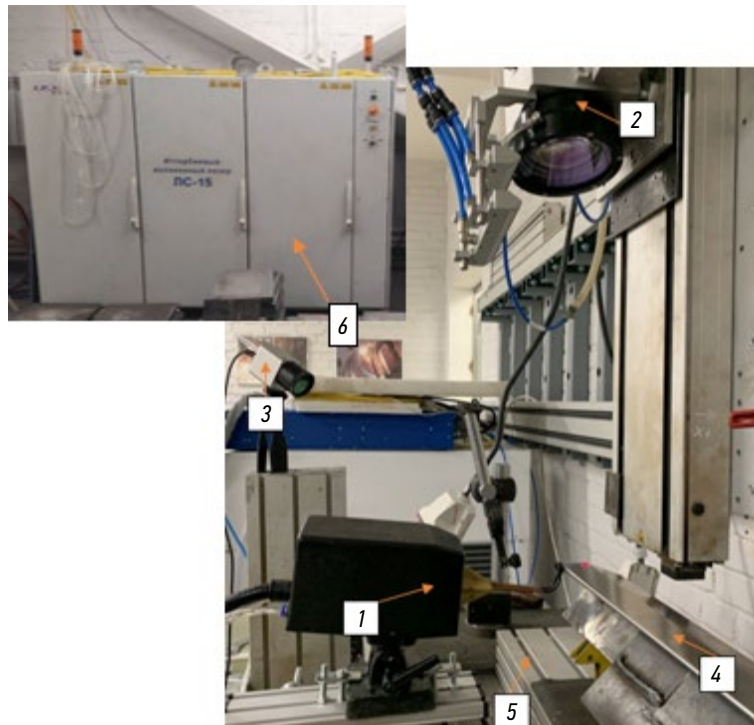


Рис. 1. Стенд для лазерно-индукционного термоупрочнения: 1 — индуктор СВЧ-6АВ; 2 — лазерная головка для сварки с гальванометром ND65; 3 — инфракрасная камера Optris PI08МТК; 4 — плоский образец из жаропрочной стали для термоупрочнения, закрепленный на сварочных магнитных упорах; 5 — 2-координатный подвижный стол; 6 — волоконный лазер ЛС-15.

Fig. 1. Laser and induction hardening bench: 1, SVCh-6AV induction coil; 2, laser welding head with ND65 galvanometer; 3, Optris PI08MTK infrared camera; 4, flat hardening test piece made of refractory steel fixed on magnetic welding clamp; 5, 2-axis moving table; 6, LS-15 fiber laser.

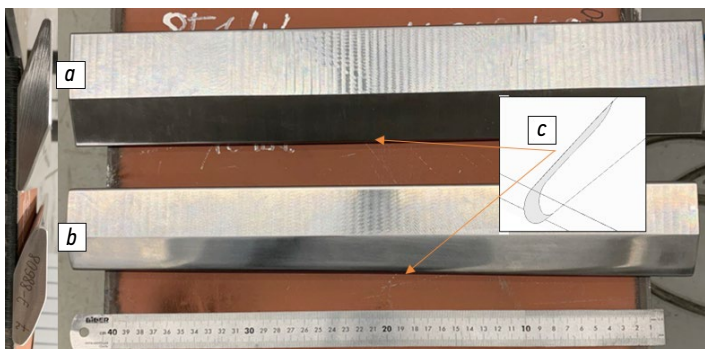


Рис. 2. Плоские образцы: *a* — постоянного сечения размерами 460×80×16,5 мм и *b* — переменного сечения размерами 450×60/70×16,8 мм из жаропрочных сталей 15Х11МФ, 20Х13, ЭИ-961; *c* — местоположение и геометрия единой зоны упрочнения.

Fig. 2. Flat test pieces: *a*, with uniform cross-section (460×80×16.5 mm); *b*, variable cross-section (450×60/70×16.8 mm), all made of refractory steels 15H11MF, AISI 420, EI961; *c*, location and dimensions of a single hardening zone.

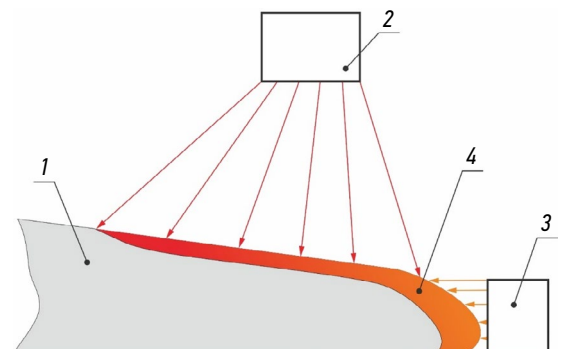


Рис. 3. 1 — обрабатываемый плоский образец; 2 — лазерный источник нагрева; 3 — индукционный источник нагрева; 4 — зона совместного действия двух источников нагрева.

Fig. 3. 1, processed flat test piece; 2, laser heat source; 3, induction heat source; 4, joint action zone of two heat sources.

Для выявления структуры проводили химическое травление реактивом Каллинга (20 мл H<sub>2</sub>O, 20 мл HCl, 4 г CuCl<sub>2</sub>) в течение 2–3 мин. Микроструктура исследовалась на оптическом микроскопе Leica DMi8 с использованием ПО Axalut. Измерения твердости и микротвердости производились на твердомере Future-Tech FM-310 с использованием ПО Thixomet Pro, с увеличением от 10х до 50х.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате экспериментов термообработки плоских образцов постоянного сечения на коротких участках длиной 50 мм было установлено, что необходимая глубина и профиль закалки (рис. 4) достигаются при максимальном нагреве образца без принудительного последующего охлаждения, на низких скоростях (до 1 мм/с), с большим пятном нагрева и наибольшей мощностью (в пределах 3 кВт), при которых не происходит оплавления поверхности.

Микроструктура упрочненного слоя образцов — однородная, мелкозернистая, оплавления в поверхностной зоне не выявлено. В микроструктуре переходной зоны окисления границ зерен, роста зерна, дефектов в виде микротрещин, несплошностей не обнаружено.

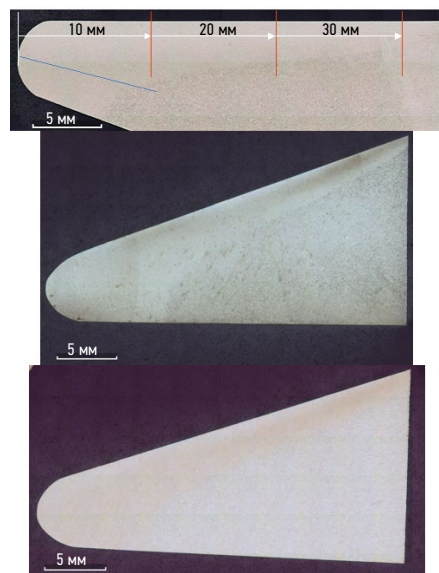


Рис. 4. Макрошлифы упрочненной зоны входной кромки плоских образцов постоянного сечения: *верх* — 15Х11МФ (красным и синим цветами показаны местоположения линий, по которым измеряли твердость на всех образцах); *середина* — 20Х13; *низ* — ЭИ-961.

Fig. 4. Large sections of the hardened zone on the leading edge of flat test pieces with uniform cross-section: *top*, 15H11MF (location of hardness measurement lines on all test pieces are shown in red and blue); *middle*, AISI 420; *bottom*, EI961.

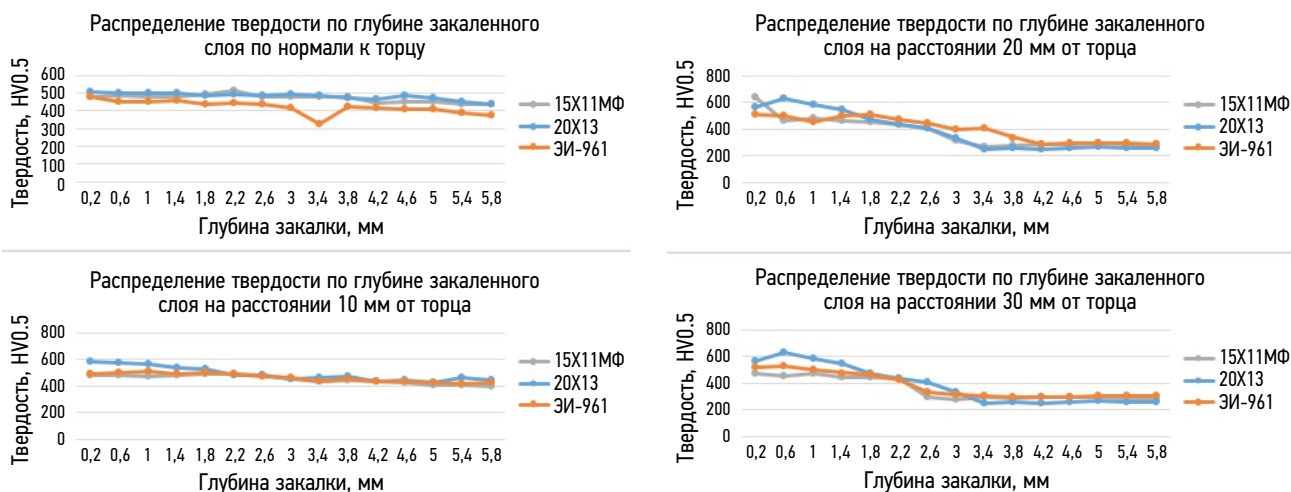


Рис. 5. Графики распределения твердости на различных участках закаленного слоя.

Fig. 5. Hardness distribution graphs for different areas of the hardened layer.

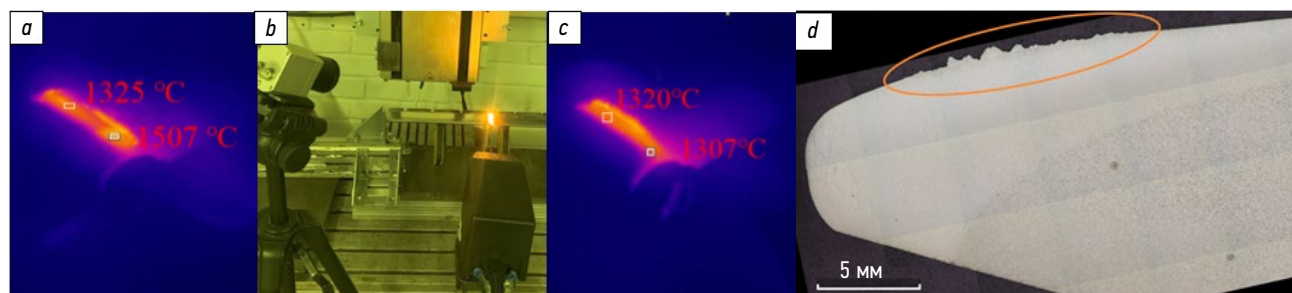


Рис. 6. Процесс термоупрочнения (b) с фиксированием температуры в области нагрева с постоянной (a) и изменяемой (c) мощностью лазера по амплитуде сканирования; макрошлиф упрочненной зоны входной кромки (d) плоского образца постоянного сечения 15Х11МФ с характерной зоной оплавления в общей зоне действия двух источников нагрева.

Fig. 6. Hardening process (b) with temperature recording in the heating area with constant (a) and variable (c) laser power by scanning amplitude; large section of the hardened zone on the leading edge (d) of a flat 15H11MF test piece with uniform cross-section and a typical glazing zone in the joint action area of two heat sources.

Для полученных образцов была измерена твердость закаленной зоны (по линиям, указанным на рис. 4, *верх*), результаты представлены на графиках (рис. 5).

Глубина упрочненного слоя в области входной кромки составляет не менее 5 мм, а на примыкающем участке спинки лопатки — не менее 2 мм. Получена твердость в границах упрочненного слоя не менее 400 HV0.5.

С помощью инфракрасной камеры было установлено, что оплавление появляется, когда температура нагрева на поверхности превышает 1400 °С. Наибольшая вероятность оплавления локализуется в зоне совместного действия источников нагрева на спинке, на расстоянии 10–15 мм от входной кромки (рис. 6, *d*).

При переходе на образцы с переменным сечением для обеспечения желаемой глубины упрочнения входной кромки необходимо было увеличить мощность индуктора. При этом на постоянной мощности лазера по амплитуде сканирования излучения оплавление поверхности всегда присутствовало, т.к. в общей зоне действия двух источников нагрева температура лежала выше границы 1400 °С (рис. 6, *a*). Для его устранения была изменена мощность лазера по амплитуде сканирования путем разбиения на два участка с разной мощностью на каждом. В зоне

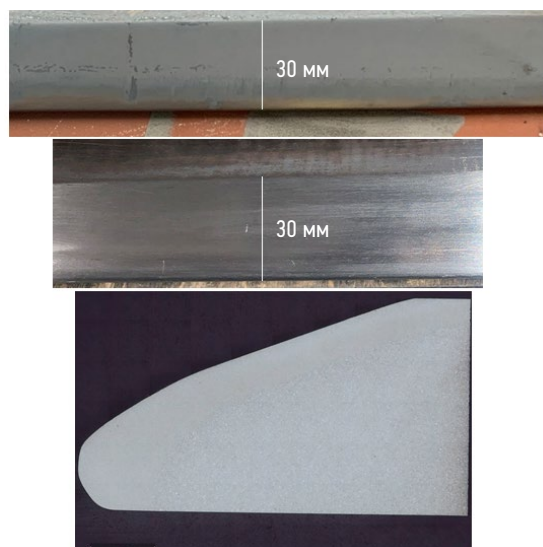


Рис. 7. Внешний вид упрочненной зоны поверхности переменного сечения образца 15X11MF: *верх* — после закалки; *середина* — после механической зачистки абразивной бумагой; *низ* — макрошлифы упрочненной зоны входной кромки.

Fig. 7. View of the hardened zone of the variable cross-section surface of the 15H11MF test piece: *top*, after hardening; *middle*, after grinding with abrasive paper; *bottom*, large sections of the hardened zone on the leading edge.

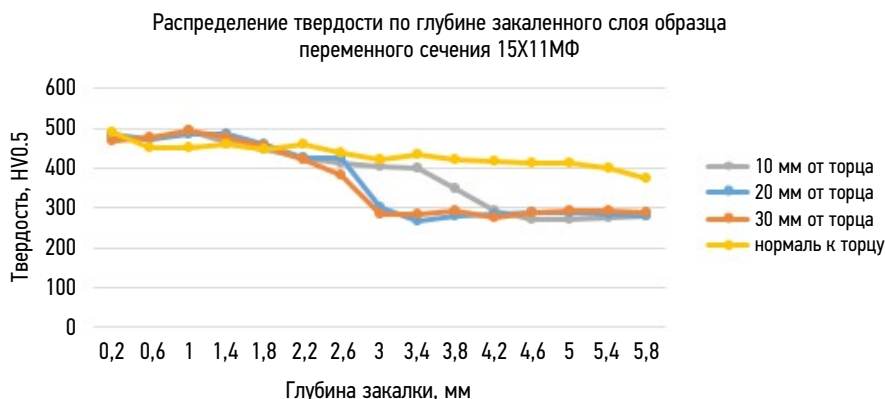


Рис. 8. График распределения твердости на различных участках закаленного слоя образца переменного сечения 15X11MF.  
Fig. 8. Hardness distribution graph for different areas of the hardened layer of the 15H11MF test piece with variable cross-section.

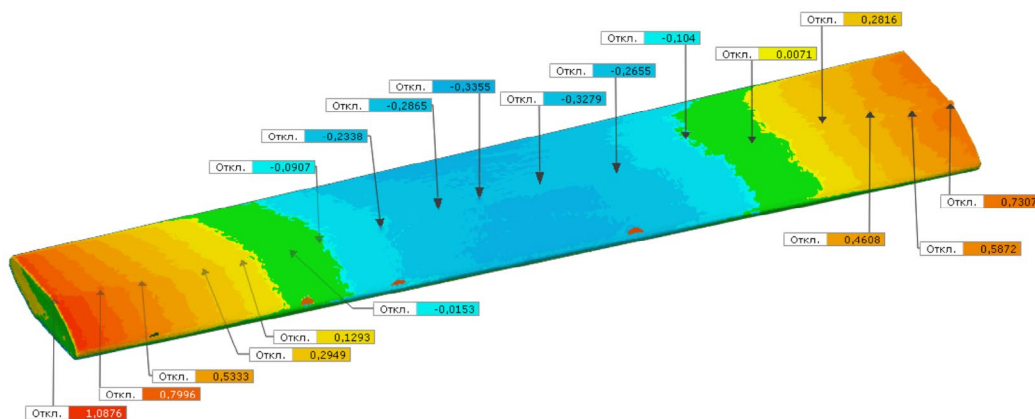


Рис. 9. Визуализация деформации пластины после термоупрочнения. Указаны значения отклонений от первоначального состояния образца до обработки в миллиметрах.

Fig. 9. Visualization of plate deformation after hardening. Deviations from the original state of the test piece before processing are indicated in millimeters.

совместного действия источников нагрева мощность лазера была снижена на 40 %. В результате этих мер температура на поверхности во время термообработки не превышала обозначенную границу появления оплавления (рис. 6, с).

После подбора оптимального режима упрочнения на коротких участках был обработан плоский образец 15X11МФ переменного сечения на всю длину (рис. 7). После зачистки образца абразивной бумагой на нем не наблюдались дефекты в виде микротрещин и несплошностей, а также оплавления поверхности.

Для макрошлифа, представленного на рис. 7, была измерена твердость, результаты которой показаны на графике (рис. 8). Полученные значения аналогичны результатам, полученным для плоских образцов постоянного сечения, по глубине упрочненного слоя и значениям твердости.

После упрочнения образец был отсканирован с помощью 3D-сканера для контроля деформации пластины. Результаты изменения геометрии образца представлены на рис. 9. Максимальное отклонение после термообработки от первоначального состояния составило 1,09 мм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам экспериментов лазерно-индукционного термоупрочнения плоских образцов из жаропрочных сталей 15X11МФ, 20X13, ЭИ-961 можно заключить, что данный вид обработки является перспективным для замены традиционных способов термоупрочнения поверхности изделий, выполненных из этих материалов, в борьбе против эрозии.

Получена единая зона упрочнения на входной кромке и примыкающем участке спинки образцов без дефектов в виде микротрещин и несплошностей, без оплавления поверхности.

Твердость в границах упрочненного слоя со стороны входной кромки — не менее 400 HV0.5. При этом глубина упрочненного слоя в области входной кромки составляет не менее 5 мм, а на примыкающем участке спинки лопатки — не менее 2 мм.

Максимальная деформация образца после термоупрочнения не превышает 1,2 мм.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** А.Д. Ахметов — написание текста рукописи. И.А. Цибульский — экспертная оценка, утверждение финальной версии. А.О. Сидоренко, В.В. Сомонов — создание изображений, редактирование текста. **Источники финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Генеративный искусственный интеллект.** При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

## ADDITIONAL INFO

**Author contributions:** A.D. Akhmetov: writing—original draft; I.A. Tsybul'skiy: writing—review & editing; A.O. Sidorenko, V.V. Somonov: visualization, writing—review & editing.

**Funding sources:** The study was not supported by any external sources.

**Disclosure of interests:** The authors have no explicit or potential conflicts of interests associated with the publication of this article.

**Generative AI:** No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cook S.S. Erosion by Water-Hammer // Proceedings of The Royal Society: A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1928. Vol. 119, № 783. P. 481–488. doi: 10.1098/rspa.1928.0107
2. Gardner G.C. Events leading to erosion in the steam turbines // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. 1963. Vol. 178, № 1. P. 593–601.
3. Heymann F., Thiruvengadam A. Characterization and Determination of Erosion Resistance ASTM STP 474. In: A Symposium Presented at the Seventy-second Annual Meeting. Atlantic City: American Society for Testing and Materials, 1969.
4. Heymann F. J. Liquid impingement erosion // ASM Handbook, ASM International Material Park, OH. 1992. Vol. 18. P. 221–232.
5. Schuerhoff J., Ghicov A., Sattler K. Advanced water droplet erosion protection for modern low pressure steam turbine steel blades. In: Proceedings of ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition. 2015. Vol. 8. doi: 10.1115/GT2015-43140
6. Yuwei Wei, Yongjun Li, Jiafeng Lai, et al. Analysis on corrosion fatigue cracking mechanism of 17-4PH blade of low-pressure rotor of steam turbine // Engineering Failure Analysis. 2020. Vol. 118. doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104925 EDN: YUPAWJ
7. Тополянский П. А. Повышение эрозионной стойкости входных кромок лопаток ступеней низкого давления паровых турбин (обзор). В кн.: Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций. Материалы 4-й Всероссийской практической конференции 16–18 апреля 2002 г. Санкт-Петербург: СПбГТУ, 2002. С. 30–49. EDN: XCWSXB
8. Sabaa Sattar, Yaser Alaiwi, Nabaa Sattar Radhi, et al. Corrosion reduction in steam turbine blades using nano-composite coating // Journal of King Saud University. 2023. Vol. 35. № 8. doi: 10.1016/j.jksus.2023.102861
9. Неуймин В. М. О стойкости стеллитовой защиты рабочих лопаток последних ступеней паровых турбин // Энергосбережение и водоподготовка. 2010. № 2 (64). С. 52–54. EDN: MVKDGH

10. Сомонов В.В. Цибульский И.А. Эффективность использования волоконных лазеров для лазерной закалки изделий в промышленности // *Металлообработка*. 2014. № 1 (79). С. 9–12. EDN: SITSQF
11. Somonov V.V. Tsibulskiy I.A., Mendagaliyev R., Akhmetov A. Investigation of the Technological Possibility of Laser Hardening of Stainless Steel 14Cr17Ni2 to a Deep Depth of the Surface // *Metals*. 2022. Vol. 12. № 1. P. 5. doi: 10.3390/met12010005 EDN: LAUUMX
12. Kennedy E. Byrne G., Collins D.N. A review of the use of high power diode lasers in surface hardening // *Journal of Materials Processing Technology*.

2004. Vol. 155–156. P. 1855–1860. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.276 EDN: KLQSLX
13. Jianhua Yao, Qunli Zhang, Fanzhi Kong, Qingming Ding. Laser hardening techniques on steam turbine blade and application // *Physics Procedia*. 2010. Vol. 5. P. 399–406. doi: 10.1016/j.phpro.2010.08.161
14. Pavan A.H.V., Somnath Nandi, Amit Kumar, Swamy M. Effect of laser hardening and post hardening shot peening on residual stress evolution in X5CrNiCuNb16-4 steel for steam turbine blade applications // *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 60. P. 277–285. doi: 10.1016/j.prostr.2024.05.049

## REFERENCES

1. Cook SS. Erosion by Water-Hammer. *Proceedings of The Royal Society: A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1928;119(783):481–488. doi: 10.1098/rspa.1928.0107
2. Gardner GC. Events leading to erosion in the steam turbines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 1963;178(1):593–601.
3. Heymann F, Thiruvengadam A. *Characterization and Determination of Erosion Resistance ASTM STP 474*. In: *A Symposium Presented at the Seventy-second Annual Meeting*. Atlantic City: American Society for Testing and Materials, 1969.
4. Heymann F.J. *Liquid impingement erosion*. ASM Handbook. Ohio: ASM International Material Park; 1992;18:221–232.
5. Schuerhoff J, Ghicov A, Sattler K. Advanced water droplet erosion protection for modern low pressure steam turbine steel blades. In: *Proceedings of ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition*. 2015;8. doi: 10.1115/GT2015-43140
6. Yuwei Wei, Yongjun Li, Jiafeng Lai, et al. Analysis on corrosion fatigue cracking mechanism of 17-4PH blade of low-pressure rotor of steam turbine. *Engineering Failure Analysis*. 2020;118. doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104925 EDN: YUPAWJ
7. Topolianskii PA. Increase of erosion resistance of inlet edges of low-pressure blades of steam turbine stages (review). In: *Technologies of repair, restoration, hardening and renewal of machines, mechanisms, equipment and metal structures. Materials of the 4th All-Russian Practical Conference April 16–18, 2002*. St. Petersburg: SPbSTU; 2002:30–49. (In Russ.) EDN: XCWSXB
8. Sabaa Sattar, Yaser Alaiwi, Naba Sattar Radhi, et al. Corrosion reduction in steam turbine blades using nano-composite coating. *Journal of King Saud University*. 2023;35(8). doi: 10.1016/j.jksus.2023.102861
9. Neumin VM. About durability of stellite protection of working blades of the last stages of steam turbines. *Energy saving and water treatment*. 2010;2(64):52–54. EDN: MVKDGH
10. Somonov VV, Tsibulskiy IA. Efficiency of using fiber lasers for laser hardening of products in industry. *Metalloobrabotka*. 2014;1(79):9–12. (In Russ.) EDN: SITSQF
11. Somonov VV, Tsibulskiy IA, Mendagaliyev R, et al. Investigation of the Technological Possibility of Laser Hardening of Stainless Steel 14Cr17Ni2 to a Deep Depth of the Surface. *Metals*. 2022;12(1):5. doi: 10.3390/met12010005 EDN: LAUUMX
12. Kennedy E, Byrne G, Collins DN. A review of the use of high power diode lasers in surface hardening. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004;155–156:1855–1860. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.276 EDN: KLQSLX
13. Jianhua Yao, Qunli Zhang, Fanzhi Kong, et al. Laser hardening techniques on steam turbine blade and application. *Physics Procedia*. 2010;5:399–406. doi: 10.1016/j.phpro.2010.08.161
14. Pavan AHV, Somnath Nandi, Amit Kumar, et al. Effect of laser hardening and post hardening shot peening on residual stress evolution in X5CrNiCuNb16-4 steel for steam turbine blade applications. *Procedia Structural Integrity*. 2024;60:277–285. doi: 10.1016/j.prostr.2024.05.049

## ОБ АВТОРАХ

\***Александр Дмитриевич Ахметов**, ведущий инженер технологического отдела, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, Лотманская ул., д. 3; ORCID: 0000-0002-4472-2115; eLibrary SPIN: 3756-9277; e-mail: a.akhmetov@ltc.ru

**Игорь Александрович Цибульский**, ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; eLibrary SPIN: 3110-5791; e-mail: igor@ltc.ru

**Антон Олегович Сидоренко**, инженер отдела тестирования материалов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; eLibrary SPIN: 8946-8560; e-mail: anton-sidorenko10@mail.ru

**Владислав Валерьевич Сомонов**, ведущий инженер, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Национальный исследовательский университет ИТМО; eLibrary SPIN: 1648-4357; e-mail: vlad@ltc.ru

## AUTHORS' INFO

\***Aleksander D. Akhmetov**, Leading Engineer of the Technological Department, Saint Petersburg State Marine Technical University; address: 3, Lotmanskaya St., Saint Petersburg, 190121, Russia; ORCID: 0000-0002-4472-2115; eLibrary SPIN: 3756-9277; e-mail: a.akhmetov@ltc.ru

**Igor A. Tsibulsky**, Leading Research Associate, Saint Petersburg State Marine Technical University; eLibrary SPIN: 3110-5791; e-mail: igor@ltc.ru

**Anton O. Sidorenko**, Engineer Materials Testing Department, Saint Petersburg State Marine Technical University; eLibrary SPIN: 8946-8560; e-mail: anton-sidorenko10@mail.ru

**Vladislav V. Somonov**, Lead Engineer, Saint Petersburg State Marine Technical University, National Research University ITMO; eLibrary SPIN: 1648-4357; e-mail: vlad@ltc.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author