

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 621.891.22

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ШЛИЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКЕ

© 2025 г. В. П. Бирюков*

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, 101000 Россия

**E-mail: laser-52@yandex.ru*

Поступила в редакцию 26.05.2024 г.

После доработки 27.05.2024 г.

Принята к публикации 31.05.2024 г.

В работе рассмотрен процесс лазерного упрочнения образцов стали 42ХН2МА с использованием непрерывного излучения и поперечных колебаний луча с частотой 223 Гц. Определено влияние режимов обработки на параметры отклика системы глубину и ширину зон лазерной закалки. Показано, что применение поперечных колебаний луча повышает микротвердость, площадь закаленного слоя его равномерность и сохраняет геометрическую форму профиля шлица по сравнению с обработкой дефокусированным пучком. Износостойкость зон упрочненных лазерным лучом значительно выше материала основы.

Ключевые слова: лазерное упрочнение, износостойкость, коэффициент трения

DOI: 10.56304/S207956292406006X

1. ВВЕДЕНИЕ

Благодаря своей компактной конструкции и простоте монтажа шлицевые соединения нашли широкое применение в области механики. Существует множество причин износа шлицев [1], и учеными по всему миру были проведены обширные исследования по этой теме. Загрузочный насос является важной частью оборудования на атомных электростанциях для регулирования химического состава и объема первичного контура. В ряде случаев после ввода в эксплуатацию загрузочного насоса во внутренних шлицах гидромотора наблюдались частые отказы и различная степень износа. Эта проблема отрицательно сказалась на безопасной и стабильной работе реактора атомной электростанции. Авторы работы [2] экспериментальными методами изучили характер повреждений на поверхностях прямозубых и барабанно-зубчатых шлицевых муфт при различных рабочих нагрузках, и определили различные типы повреждений между прямозубыми и барабанно-зубчатыми шлицевыми соединениями. Разработка новых упрочняющих технологий шлицевых соединений является актуальной задачей современного машиностроения и одной из таких технологий может стать лазерное упрочнение.

Сталь марки 42CrMo [3–6] широко используется для изготовления различных деталей общего назначения, таких как коленчатые и шлицевые валы, шпиндели, шестерни, пресс-формы, литейные валки, гидравлические поршни, цепные

звездочки подшипники и т.д. Поверхность этой стали подвержена износу и коррозии, что приводит к сокращению срока ее службы. Образцы [3] стали 42CrMo были обработаны с помощью однопроводного лазерного упрочнения поверхности с размером пятна 2 мм, скоростью сканирования 1800 мм/мин и мощностью 2200 Вт. Была получена твердость зоны упрочнения в 1.6 раза выше, чем у основного объемно закаленного материала, а толщина зоны упрочнения достигала 1.05 мм. Результаты металлографии показали, что мартенсит в зоне упрочнения был значительно мельче, чем в подложке. В мартенситной зоне упрочнения было много малоугловых границ зерен, а ориентация зерен была неравномерной, что еще больше повышало твердость лазерной закалки, особенно вблизи подложки.

Для экспериментальных испытаний [7] была использована модель оси в масштабе 1 : 3, выкованная из стали EA1N (0.4% C) с диаметром посадочного места под лазерную закалку 69 мм. Покрытие наносилось с использованием лазера компании LaserLine 6000, GmbH, Кобленц, Германия с роботом KUKA KR16 (KUKA AG, Аугсбург, Германия). Было установлено, что лазерное упрочнение увеличивало усталостную долговечность модельных осей. Шейки осей, закаленные лазером, были устойчивы не только к фреттинг-коррозии, но и к фактическим повреждениям после прессования. Повышенная твердость упроч-

ненных лазером слоев, позволяла повторно использовать оси после демонтажа.

Лазерное упрочнение [8] поверхности стали AISI 4130 было проведено с использованием диодного лазера с максимальной мощностью 1600 Вт. Для повышения поглощения лазерного излучения на поверхность образца был нанесен углеродный порошок. Было установлено, что из-за увеличения поглощения лазерного излучения на образцах с углеродным покрытием зона упрочнения больше (глубже и шире), а значение твердости больше, чем при лазерном упрочнении образцов без покрытия. Анализ микроструктуры показал, что превращение остаточного аустенита в мартенсит из-за быстрой закалки приводило к уменьшению ферритной фазы в мартенситной структуре в упрочненном лазером слое и повышало микротвердость. Было показано, что глубина, ширина и максимальная твердость образца с углеродным покрытием и без него, после лазерной закалки, без поверхностного оплавления составляли 1.150, 9.980 мм, 762 HV и 0.957, 9.451 мм и 707 HV соответственно.

Лазерная закалка [9] образцов стали EN25 (0.31% C) была выполнена с использованием Nd:YAG лазерной системы при мощности лазерного луча 750–1250 Вт и скорости движения рабочего стола 500–1000 мм/мин. Было установлено, что микроструктура поверхностного слоя состояла из мартенситных игл. Твердость материала основы стали EN25 составляла 360–380 HV_{0.5} и была увеличена до 782 HV_{0.5} после лазерной закалки. Более высокая скорость перемещения 1000 мм/мин обеспечивала крупнозернистую структуру мартенсита, а более низкая скорость перемещения 500 мм/мин приводила к образованию тонкой мартенситной структуры, которая имела более высокую твердость, чем крупнозернистая структура. Было установлено, что при обработке на мощности в 750 Вт (плотности мощности $3.97 \cdot 10^4$ Вт/см²) максимальная глубина и ширина зоны упрочнения составляла 0.7 и 2.2 мм соответственно, а при плотности мощности $5.3 \cdot 10^4$ Вт/см² глубина упрочнения была 0.8–1.12 мм, при ширине дорожки закалки – 2.2–2.5 мм.

Образцы [10] мартенситной нержавеющей стали AISI 440C были упрочнены с использованием мощного непрерывного Nd:YAG-лазера. На поверхности образцов был получен упрочненный слой толщиной около 100 мкм, состоящий из мартенсита, остаточного аустенита и мелких карбидов. Микроструктура и твердость обработанного лазером слоя зависели от параметров лазерной обработки, и имели значения твердости 600–800 HV. По сравнению с образцами, подвергнутыми обычной термической обработке, образцы, обработанные лазером содержали больше остаточного аустенита и более мелкие карбиды благодаря бо-

лее высокой степени растворения карбида. Стойкость AISI 440C к кавитационной эрозии значительно улучшалась после лазерной обработки и была примерно в три раза выше по сравнению с показателями, достигнутыми при обычной термообработке.

Проведено исследование [11] механических, трибологических и коррозионных свойств легированных сталей AISI 4340, AISI 5140 и AISI 8620 с помощью лазерной закалки. Было выполнено лазерное упрочнение круглые образцов диаметром 55–80 мм и толщиной 7–12 мм. Лазерное упрочнение было проведено с использованием мощного диодного лазера мощностью 1.2 кВт (Laserline, модель LDF-3000-100, Германия со скоростью 4 и 6 мм/с, эллиптическим пятном 0.6 и 1.9 мм по малой и большой осям соответственно. Было установлено, что оптимальными параметрами лазерной закалки для всех марок стали была скорость сканирования 4 мм/с и температура поверхности 1300°C. Анализ полученных результатов при испытании на износ на машине трения с возвратно-поступательным движением показал, что при лазерном упрочнении скорость износа всех марок стали снижалась при приложенных нагрузках 30 и 60 Н. Максимальная микротвердость 600–800 HV была получена на глубине 50–300 мкм. Было установлено, что лазерная закалка повышала коррозионную стойкость стали AISI 4340.

Анализ проведенных исследований свидетельствует о недостаточной изученности влияния лазерного упрочнения на кромки образцов и на триботехнические свойства полученных упрочненных зон.

Целью настоящих исследований являются определение геометрических параметров упрочненных зон кромок образцов, их микротвердости, и триботехнических свойств зон лазерной закалки.

2. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ ОБРАЗЦОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты по лазерному упрочнению (ЛУ) были проведены на лазерном автоматизированном технологическом комплексе ИМАШ РАН. В качестве материала подложки были использованы образцы стали 42ХН2МА с размерами 12 × 20 × 70 мм. Для повышения поглощательной способности на образцы было нанесено покрытие СГ504 на водной основе, с последующей его сушкой при 80°C в течение 30 мин. Лазерное упрочнение было выполнено при мощности излучения (P) 700–1000 Вт, скорости перемещения (V) луча 7–10 мм/с, диаметром лазерного пятна 3.2–5.4 мм. Окончательная обработка партии образцов для триботехнических испытаний была выполнена на оптимальных

Таблица 1. Уровни факторов эксперимента

Фактор z_i	Верхний уровень фактора z_i^+	Нижний уровень фактора z_i^-	Центр плана z_i^0	Интервал варьирования λ_i	Зависимость кодированной переменной от натуральной
P , Вт	1000	700	850	150	$x_i = \frac{P_i - 850}{150}$
V , мм/с	10	7	8.5	1.5	$x_i = \frac{V_i - 8.5}{1.5}$

режимах. Металлографические исследования были проведены на металлографическом и цифровом микроскопах. Измерение микротвердости были выполнены на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 0.98 Н. Испытания на трение и износ были выполнены на машине трения с использованием схемы: “плоскость (образец стали 42ХН2МА с

лазерным упрочнением) – кольцевая поверхность торца втулки контрообразца (сталь 40Х, 49-54HRC)”.

Для определения геометрических параметров упрочненных дорожек был применен метод планирования полного факторного эксперимента (ПФЭ). При математическом моделировании в качестве откликов системы рассматривались глу-

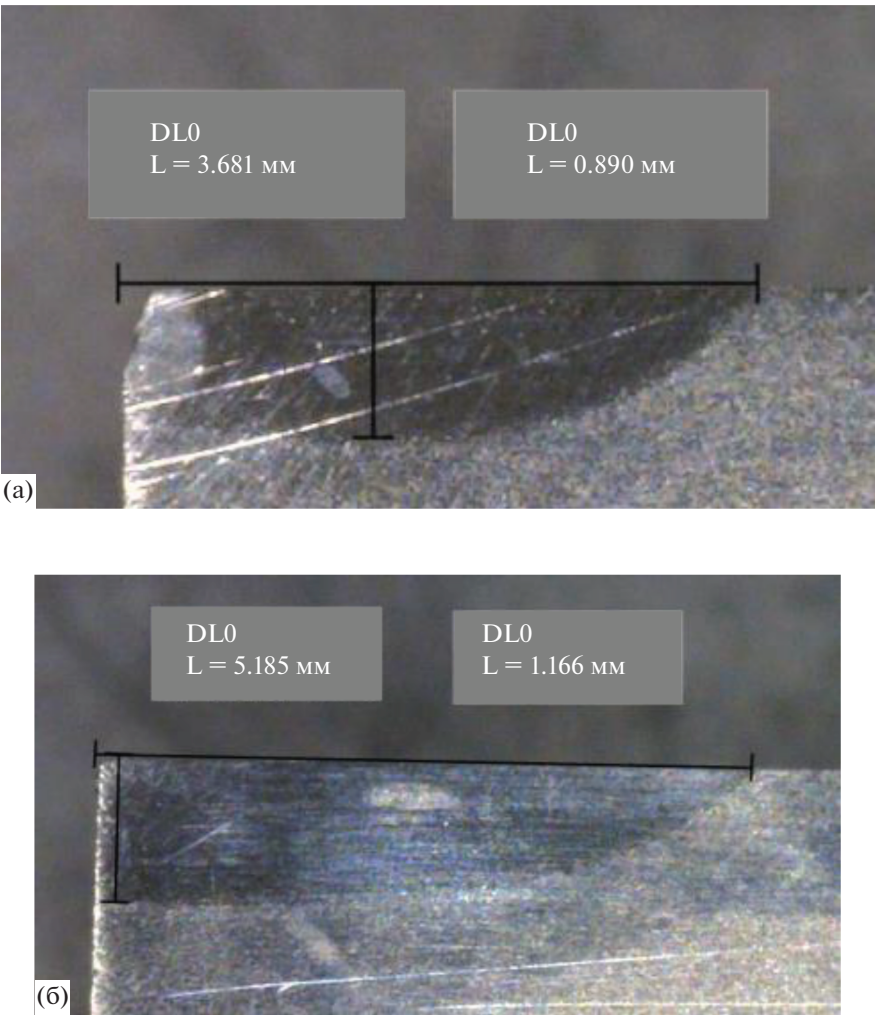


Рис. 1. Микрошлифы зон лазерной закалки стали 42ХН2МА: (а) расфокусированным лучом, (б) колеблющимся лучом.

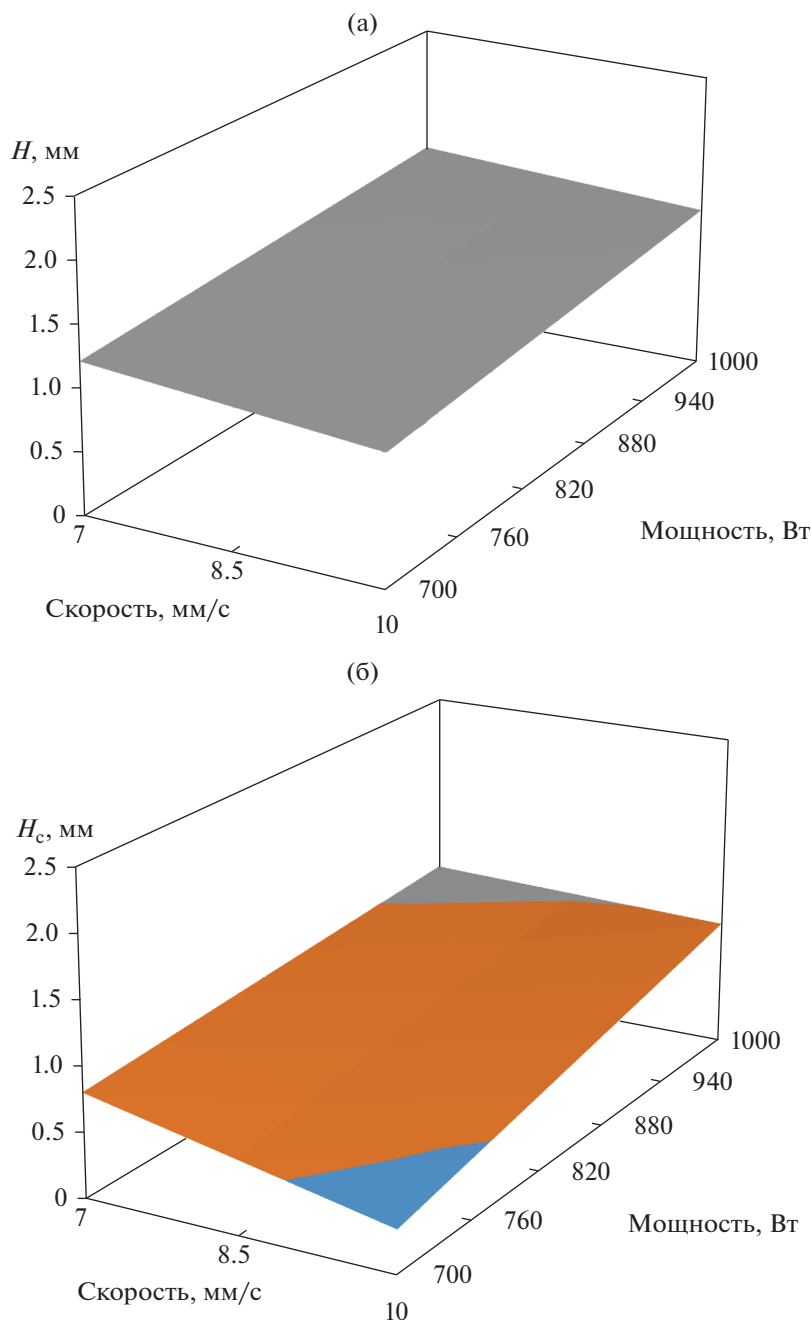


Рис. 2. Зависимость глубины и ширины дорожек лазерной закалки от скорости и мощности обработки: (а, в) расфокусированным лучом, (б, г) колеблющимся лучом.

бина H и ширина B дорожек закалки. В табл. 1 приведены уровни факторов эксперимента.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 1 представлен микрошлиф закаленного лазером образца. Глубина и ширина зоны упрочнения при обработке расфокусированным и колеблющимся лучом составила 0.48–0.89 и

0.47–1.17 мм и 1.9–3.5 и 3.2–5.9 мм соответственно. Качество и геометрические размеры профиля шлица сохраняется при упрочнении колеблющимся лучом (рис. 1б), а при обработке круглым расфокусированным пятном кромка частично испаряется и оплавляется (рис. 1а).

На рис. 2 представлены зависимости глубины и ширины зон лазерной закалки стали 42ХН2МА. Микротвердость при упрочнении колеблющимся лучом варьировалась в пределах 6480–8560 МПа,

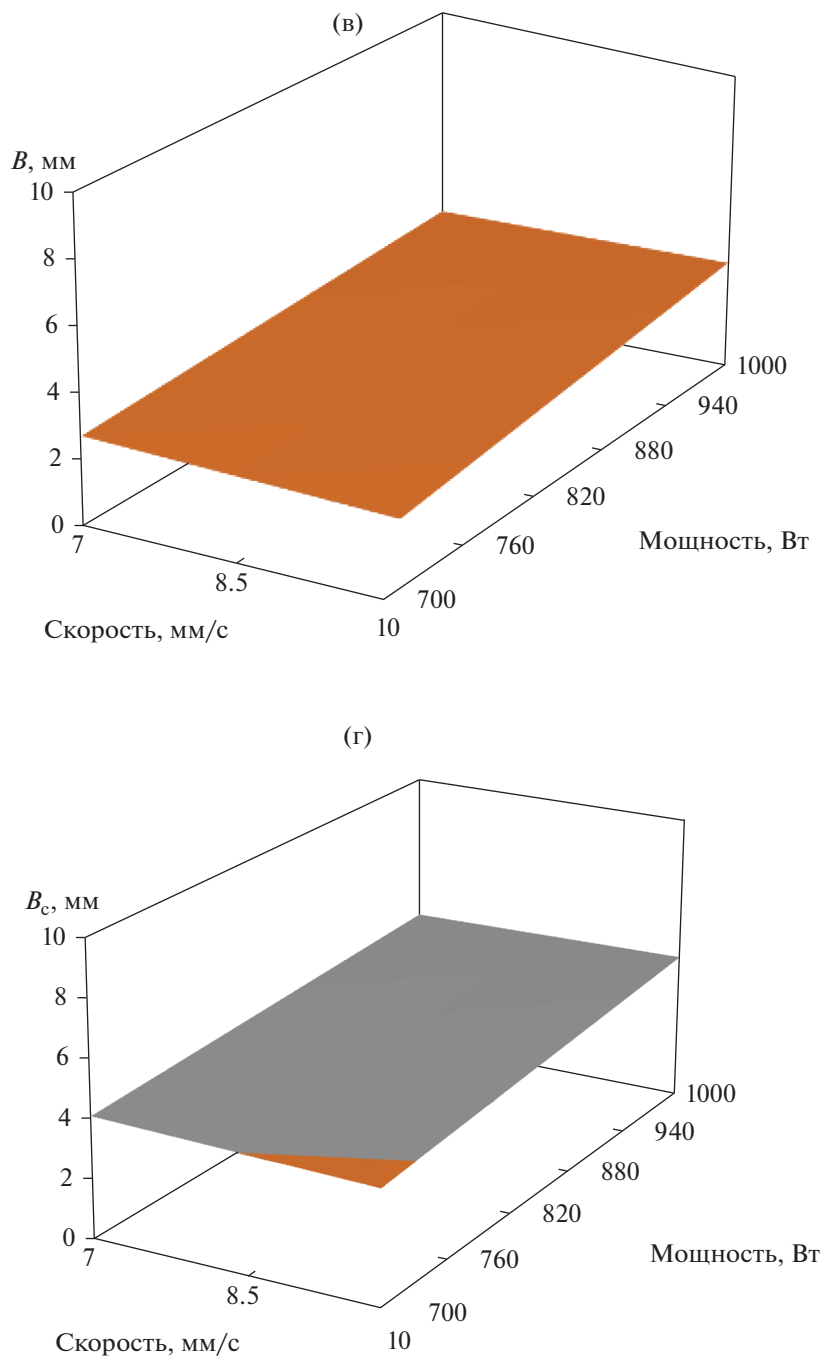


Рис. 2. Окончание

что на 700–860 МПа выше, чем при обработке расфокусированным лучом.

Из проведенных испытаний следует, что интенсивность изнашивания материала основы стали 42ХН2МА (262–296 HV) составила $2.17 \cdot 10^{-9}$, закаленных лазерным лучом образцов с поперечными колебаниями с твердостью (660–770 HV) (689–785 HV) – $0.57 \cdot 10^{-9}$ и $0.45 \cdot 10^{-9}$ соответствен-

но. Минимальные коэффициенты трения получены при более высокой твердости закаленных слоев.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана технология лазерной закалки кромки шлица стали 42ХН2МА с поперечными колебаниями луча с сохранением его размеров и геометрической формы. Микротвердость шлицев

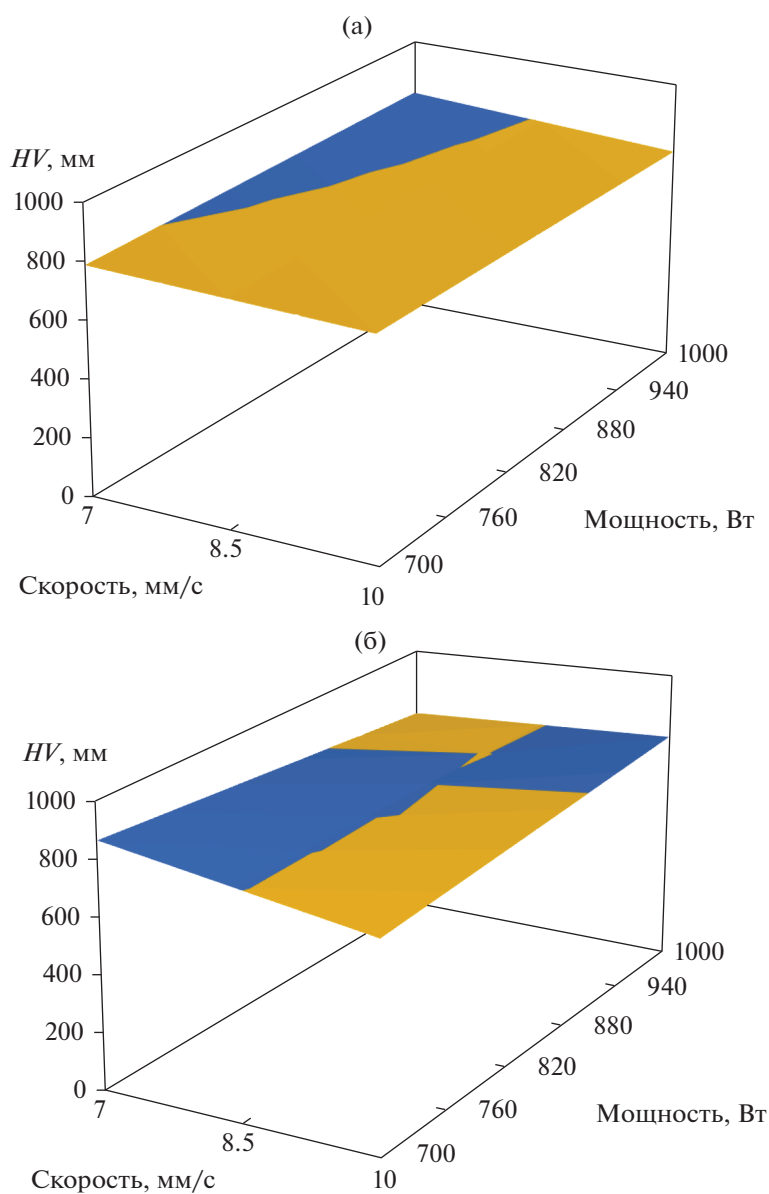


Рис. 3. Зависимость микротвердости от мощности излучения и скорости обработки: (а) расфокусированным лучом, (б) колеблющимся лучом.

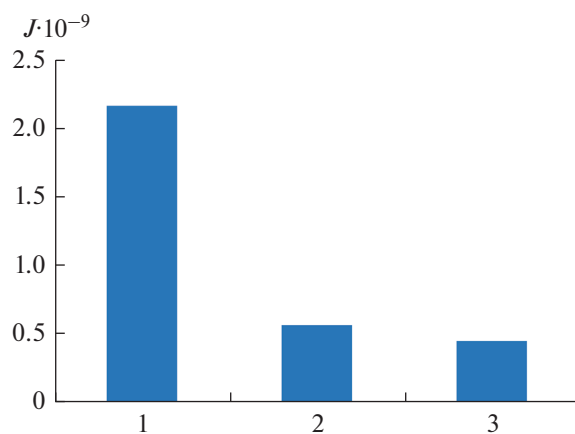


Рис. 4. Интенсивность изнашивания стали 42ХН2МА: 1 – основа (262–296 HV), 2 – ЛУ (660–770 HV), 3 – ЛУ (689–785 HV).

упрочненных с использованием поперечных колебаний луча была выше, чем при обработке расфокусированным лучом. Износостойкость закаленных лазерным лучом зон была значительно выше материала основы. Минимальные коэффициенты трения были получены при большей твердости зон упрочнения. Технология лазерной закалки шлицевых соединений может быть использована в узлах трения гидронасосов для повышения ресурса их работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Curà F., Mura A. // *Mech. Syst. Signal Process.* 2014. V. 45. P. 504.
2. Wu Y., Liang Y., Yin C., et al. // *Eng. Failure Anal.* 2023. V. 146. P. 107113.
3. Wang H., Zhai Y., Zhou, L., Zhang Z. // *Coatings.* 2021. V. 11. P. 997.
4. Wu J., Mao C., Wei K., Hu J. // *J. Mater. Res. Technol.* 2022. V. 18. P. 3819.
5. Cheng Y., Cui R., Wang H., Han Z. // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2018. V. 96. P. 1715.
6. He P., Ding Y., Jiang S., et al. // *Photonics.* 2023. V. 10. P. 287.
7. Capek J., Trojan K., Kec J., et al. // *Metals.* 2024. V. 14. P. 290.
8. Moradi M., Moghadam M.K., Kazazi M. // *Optik.* 2019. V. 178. P. 614.
9. Babu P.D. et al. // *Trans. Can. Soc. Mech. Eng.* 2012. V. 36 (3). P. 241.
10. Lo K.H., Cheng F.T., Man H.C. // *Surf. Coat. Technol.* 2003. V. 173 (1). P. 96.
11. Albahlol O.A.A., Harun C.U.G., Akgul Y. // *J. Min. Metall., Sect. B.* 2023. V. 59 (2). P. 255.

Improving the Reliability of Splined Joints During Laser Quenching

V. P. Biryukov*

Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 101000 Russia

**e-mail: laser-52@yandex.ru*

Received May 26, 2024; revised May 27, 2024; accepted May 31, 2024

Abstract—The process of laser hardening of 42KhN2MA steel samples using continuous radiation and transverse beam vibrations at a frequency of 223 Hz has been considered. The influence of processing modes on the response parameters of the system, the depth and width of the laser quenching regions has been determined. It has been shown that the use of transverse beam vibrations increases the microhardness, the area of the hardened layer, its uniformity and preserves the geometric shape of the slot profile compared to processing with a defocused beam. The wear resistance of the laser-hardened regions is significantly higher than the base material.

Keywords: laser hardening, wear resistance, coefficient of friction