

Научная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 533.924

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.03.013

**ИЗМЕНЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ И МИКРОТВЕРДОСТИ СТАЛИ ШХ15
ПРИ ОБРАБОТКЕ ИМПУЛЬСНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ****Антон Константинович Кутуков^{1†}, Антон Александрович Сергеечев²,
Мария Александровна Миллер³, Вероника Валерьевна Гапонова⁴**^{1, 2, 3, 4} АО «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», ул. Пушкинских, 12, 108840, Москва, Троицк, Россия^{1, 3, 4} НИТУ «Московский институт стали и сплавов», Ленинский пр., 4, 119049, Москва, Россия¹ kutukov@triniti.ru[†], <https://orcid.org/0009-0005-9737-3405>² sergeechev@triniti.ru, <https://orcid.org/0009-0007-5220-7408>³ miller@triniti.ru, <https://orcid.org/0009-0002-3920-7968>⁴ gaponova@triniti.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9191-5174>

Аннотация. В современной промышленности существует необходимость модификации поверхностных слоев составных частей подшипников, выполненных из стали ШХ15, для увеличения их ресурса работы. Такой эффект достигается за счет повышения микротвердости. На данный момент активно изучается метод обработки импульсными плазменными потоками (ИПП). Ограничением применимости ИПП в отношении подшипниковой стали является высокие требования к шероховатости поверхности изготавливаемых изделий. В настоящей работе исследовалось влияние режимов при обработке ИПП с различной тепловой нагрузкой и количеством импульсов на шероховатость и микротвердость стали ШХ15. Целью было определение оптимальных параметров обработки, позволяющих получить сочетание наибольшего упрочнения при наименьшем изменении шероховатости. Согласно полученным результатам, после ИПП обработки при определенных параметрах удастся добиться повышения микротвердости в 4 раза. Кроме того, при достижении порога плавления шероховатость образца резко возрастает. Также проведен ряд экспериментов по определению влияния числа импульсов на изучаемые характеристики. В ходе облучения ШХ15 несколькими импульсами выяснено, что увеличение количества воздействий на материал провоцирует уменьшение микротвердости ввиду изменения количественного соотношения фаз. Показатель шероховатости изменяется в пределах 10–40 %, при этом колебания значений происходят хаотично.

Ключевые слова: подшипниковая сталь, упрочнение материалов, обработка импульсными плазменными потоками, микротвердость, шероховатость.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного контракта с ГК «Росатом» от 25.08.2022 № Н.4ф.241.09.22.1120.

Для цитирования: Кутуков А.К., Сергеечев А.А., Миллер М.А., Гапонова В.В. Изменение шероховатости и микротвердости стали ШХ15 при обработке импульсными плазменными потоками // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20, № 3. С. 398–405. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.03.013.

Original article

**ROUGHNESS AND MICROHARDNESS CHANGES OF STEEL SHKH15 AFTER PULSED
PLASMA FLOWS TREATMENT****Anton K. Kutukov^{1†}, Anton A. Sergeechev², Maria A. Miller³, Veronika V. Gaponova⁴**^{1, 2, 3, 4} JSC «State Research Center of the Russian Federation Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research», Pushkovs Str., 12, Moscow, Troitsk, 108840, Russia^{1, 3, 4} NUST «Moscow Institute of Steel and Alloys», Leninsky Pr., 4, Moscow, 119049, Russia¹ kutukov@triniti.ru[†], <https://orcid.org/0009-0005-9737-3405>

² sergeechev@triniti.ru, <https://orcid.org/0009-0007-5220-7408>

³ miller@triniti.ru, <https://orcid.org/0009-0002-3920-7968>

⁴ gaponova@triniti.ru, <https://orcid.org/0009-0000-9191-5174>

Abstract. In modern industry, there is a need to modify the surface layers of bearing components made of ShKh15 to increase their service life. This effect is achieved by increasing the microhardness. Currently, the method of pulsed plasma flows (PPF) treatment is being actively studied. The limitation of PPF applicability in relation to bearing steel is the high requirements for the surface roughness of manufactured products. In this work, we studied the influence of PPF treatment modes on roughness and microhardness of ShKh15 steel by changing thermal load and number of pulses. The goal was to determine the optimal processing parameters allowing to obtain a combination of the highest hardening with the least change in roughness. According to the results, after PPF processing under certain parameters, it is possible to achieve 4-fold increase in microhardness. In addition, when the melting threshold is reached, samples roughness sharply rises. A number of experiments were also carried out to determine the influence of the number of pulses on the studied characteristics. During the ShKh15 irradiation with several pulses, it was found out that an increase in the number of impacts on the material provokes a decrease in microhardness due to a change in the quantitative ratio of the phases. The roughness index varies within 10-40 %, while fluctuations in values occur chaotically.

Keywords: bearing steel, material hardening, pulsed plasma flows treatment, microhardness, roughness.

Acknowledgements: The work is carried out within the framework of the state contract with the State Corporation «Rosatom» dated August 25, 2022 No. N.4f.241.09.22.1120.

For citation: Kutukov, A. K., Sergeechev, A. A., Miller, M. A. & Gaponova, V. V. (2023). Roughness and microhardness changes of steel ShKh15 after pulsed plasma flows treatment. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(3), 398–405. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.03.013.

Введение

Во многих конструкциях применяются компоненты, выполненные из конструкционной стали ШХ15 [1]. Основное направление использования данной марки – составные части подшипников: внешние и внутренние кольца и тела качения в виде шариков и роликов. Главная функция подшипника – обеспечивать вращение с наименьшим сопротивлением, передавая нагрузку от подвижного узла на другие части конструкции. Подшипники подвергаются абразивному изнашиванию, приводящему к выводу из строя всего изделия. Повышенная микротвердость позволяет уменьшить степень износа рабочих тел и поверхностей, что продлевает ресурс работы изделия. При этом для корректной работы данного сборного узла требуется точное соблюдение норм шероховатости поверхности [2]. Поэтому при улучшении эксплуатационных характеристик стали важно учитывать роль шероховатости поверхности.

Сегодня для упрочнения стали ШХ15 используется термическая обработка (ТО) – отжиг, закалка и отпуск. Также применяются комбинации методов, такие как термохимическая (ТХО) и термомеханическая (ТМО) обработка. Указанные методы позволяют увеличивать микротвердость стали в 2-3 раза [3-5]. Кроме того, после закалки ввиду действия сильных остаточных напряжений часто возни-

кает коробление изделий. Похожий эффект наблюдается и в случае ТХО [6]. Также серьезным недостатком перечисленных видов обработки является их многостадийность, что делает процесс улучшения характеристик материала трудоемким и энергозатратным, а иногда и вовсе нецелесообразным.

Современными и более эффективными способами увеличения срока эксплуатации детали являются методы упрочнения поверхностного слоя изделия. Одним из наиболее перспективных видов обработки является воздействие на поверхность материала импульсными потоками плазмы (ИПП). Наряду с другими способами упрочнения концентрированными потоками энергии, в зависимости от режима обработки ИПП может наблюдаться изменение шероховатости [7-9]. В связи с этим целесообразно упрочнять только при режимах, которые позволяют получать шероховатость в допустимых диапазонах, установленных ГОСТ [2].

Целью данной исследовательской работы было определение оптимальных режимов обработки для максимального упрочнения ШХ15 при минимальном изменении шероховатости.

Методика

Обработка ИПП стали ШХ15 осуществлялась на квазистационарном плазменном ускорителе (КСПУ) [10]. Ускоритель формирует ак-

сиальные импульсные потоки плазмы, бомбардирующие материал. Установка позволяет производить сверхбыструю нагрев материалов (закалку) при задаваемых условиях – режиме обработки. Режим обработки материалов на КСПУ складывается из выбора рабочего газа, напряжения зарядки конденсаторных батарей (U , кВ), а также длительности импульса (t , мс).

Процесс обработки на КСПУ заключается в следующем (рис.1). В вакуумной камере располагается мишень с обрабатываемым стальным образцом. Мишень закреплена на рейтере таким образом, чтобы образец располагается на оси плазменного потока. Плоскость мишени перпендикулярна падающему плазменному потоку. Рейтер, в свою очередь, фиксируется на рельсе на расстоянии 25 см от плазменного ускорителя. При фиксированной $t = 1$ мс изменялось значение U от 1,4 до 1,75 кВ, выбранный плазмообразующий газ – гелий. Также варьировалось количество импульсов N : от 1 до 15. Выбранное расстояние между мишенью и плазменным ускорителем составляло 25 см.

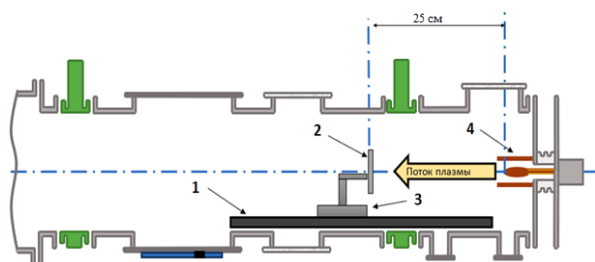


Рис.1. Схема обработки образцов ИПП на установке КСПУ [7]: 1 – рельс; 2 – мишень с образцом; 3 – рейтер; 4 – электроды ускорителя

Fig.1. Scheme of processing PPF samples at the QSPA facility [7]: 1 – rail; 2 – target with a sample; 3 – rider; 4 – accelerator electrodes

Вышеперечисленные параметры оказывают влияние на ключевую характеристику обработки – плотность энергии, поглощенной материалом (Q , Дж/см²), при которой достигается определенная температура нагрева (закалки) поверхности. С целью измерения поглощаемой тепловой нагрузки была проведена калориметрия. В результате варьирования вышеупомянутых параметров в ходе эксперимента было определено, что Q находится в диапазоне от 10 до 65 Дж/см². Значения Q определены на основе данных термо-ЭДС, полученных с хромель-алюмелевой термопары. В таблице 1 приведены значения температуры нагрева поверхности, рассчитанные, исходя из поглощенной тепловой нагрузки.

Таблица 1. Температура поверхности образцов, соответствующая различным значениям тепловой нагрузки

Table 1. Sample surface temperature corresponding to different values of thermal load

Тепловая нагрузка Q , Дж/см ² ± 10 %	Температура поверхности T , °С
10	292-355
20	580-707
30	866-1058
40	1153-1400
50	1440-1750
65	1888-2300

Исследование влияния режима обработки на шероховатость проводилось по профилям шероховатости, полученным бесконтактным методом на конфокальном микроскопе. Основным параметром, выбранным для оценки шероховатости, является среднее арифметическое отклонение профиля – R_a . В данной работе использовалось относительное изменение шероховатости δ_{III} , рассчитанное по формуле:

$$\delta_{III} = \frac{R_a^1 - R_a^0}{R_a^0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

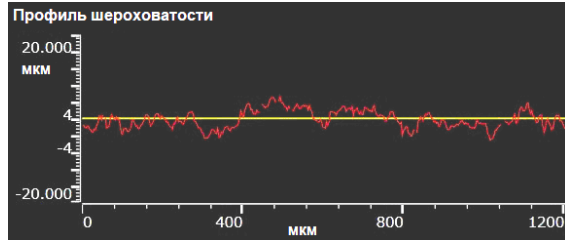
где R_a^0 – среднее арифметическое отклонение профиля исходного образца, мкм; R_a^1 – среднее арифметическое отклонение профиля облученного образца мкм.

Измерение микротвердости проводилось методом Виккерса (нагрузка 50 г), исследование топографии осуществлялось с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Также проведен рентгенофазовый анализ (РФА) образцов до и после облучения (излучение $Co-K_{\alpha}$).

Обсуждение результатов

На рис.2 представлены профили шероховатости для образцов до и после обработки. Полученные результаты сведены в график на рис.3. В зависимости от достигаемой температуры поверхности происходят изменения амплитуды распределения высот и характера профиля. Так, при $Q < 40$ Дж/см² (рис.3б), профилограмма практически не отличается от исходной, визуально на образцах наблюдаются цвета побежалости. При повышении тепловой нагрузки до 40-50 Дж/см² наблюдается сглаживание профиля: шероховатость уменьшается с 0,96 мкм до 0,84 мкм (рис.3). После достижения порога плавления ($Q = 50$ Дж/см²) характер профиля изменяется на волнообразный, а ам-

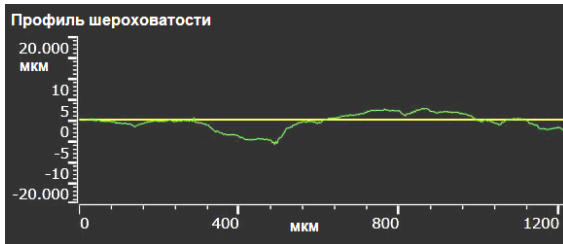
плитуда распределения высот растет (рис.2г). В работе [12] были исследованы механизмы наблюдаемого явления. Авторы пришли к выводу, что развитие волнообразного рельефа происходит в результате оплавления верхних слоев и их смещения под действием потоков плазмы.



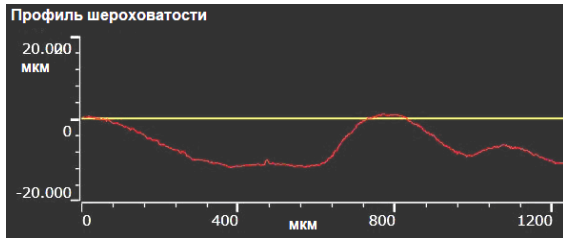
а)



б)



в)



г)

Рис.2. Профилограммы образцов, облученных гелиевой плазмой: а – до обработки; б – $Q < 40$ Дж/см²; в – $Q = 40-50$ Дж/см²; г – $Q > 50$ Дж/см²

Fig.2. Profile diagrams of samples irradiated with helium plasma: а – before treatment; б – $Q < 40$ J/cm²; в – $Q = 40-50$ J/cm²; г – $Q > 50$ J/cm²

В ходе обработки ИПП изменяется фазовый состав стали, который оказывает влияние на конечную микротвердость образцов. Дифракционные спектры образцов представлены на рис.4. На рентгенограмме исходного образца установлено преобладание α -фазы (рис.4а). При $Q = 10$ Дж/см² на полученных дифрактограм-

мах (рис.4б) наблюдается увеличение интенсивности пиков. Учитывая температуру поверхности при данной тепловой нагрузке, можно предположить, что причиной указанного изменения являются процессы возврата.

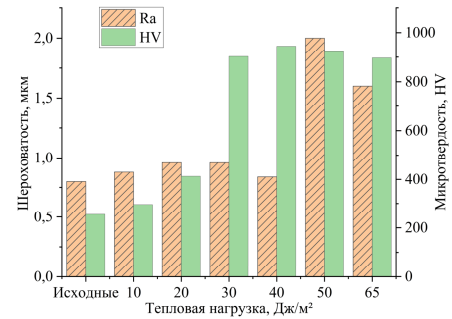


Рис.3. Зависимость микротвердости и шероховатости образцов от количества поглощенной энергии для гелиевой плазмы

Fig.3. Dependence of microhardness and roughness of samples on the amount of absorbed energy for helium plasma

В целом при $Q < 30$ Дж/см² протекание предполагаемых процессов отжига и рекристаллизации не приводят к существенному изменению микротвердости. С увеличением количества энергии дифракционные линии, соответствующие данной фазе, становятся менее интенсивными и при $Q = 50$ Дж/см² некоторые сливаются с фоном. При $Q = 30$ Дж/см² отмечается протекание мартенситного превращения, что отражается в резком скачке микротвердости (рис.3). Кроме того, отмечено образование γ -фазы (остаточного аустенита, $A_{ост}$), пики которого приобретают более выраженный характер. Возможная причина подобных изменений – перераспределение легирующих компонентов в аустените: при повышении температуры поверхности образца происходит активное насыщение аустенитной фазы углеродом (за счет полного растворения карбидов) и другими легирующими компонентами (хром, марганец) [13, 14]. Предположительно происходит понижение T начала мартенситного превращения и увеличение содержания $A_{ост}$. В связи с протеканием данных процессов при обработке стали ШХ15 гелиевой плазмой в диапазоне Q от 40 до 65 Дж/см² значение микротвердости постепенно снижается.

На СЭМ-изображениях (рис.5) отчетливо просматривается разница в топографии поверхности образцов, обработанных при режимах до и после плавления. Так, при значениях $Q < 45$ Дж/см² видны следы предобработки (шлифования), тогда как при $Q > 45$ Дж/см² поверхность сглажена, появляются неровности в результате механического воздействия плазмы.

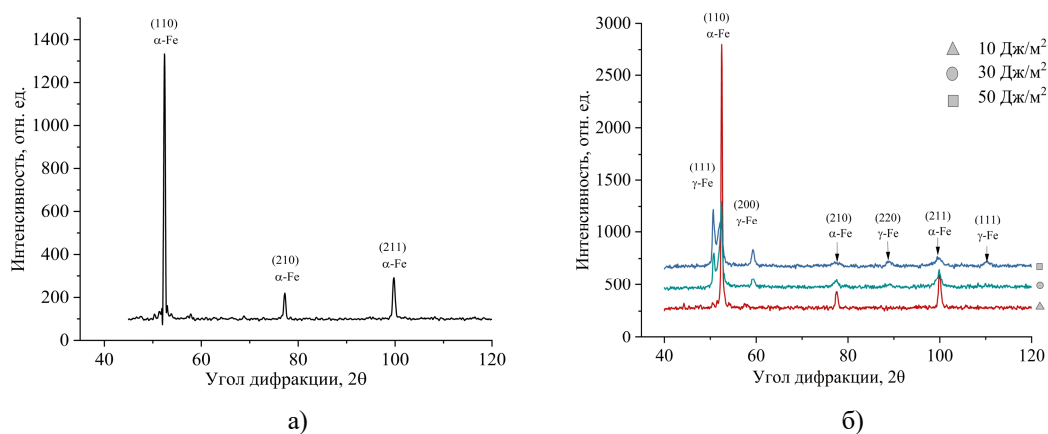


Рис.4. Дифрактограммы исходного (а) и облученных при разных режимах (б) образцов

Fig.4. X-ray diffraction patterns of the original (a) and irradiated under different modes (b) samples

Таким образом, к оптимальным режимам обработки стали ШХ15 следует отнести режимы с наибольшим приростом микротвердости при незначительном изменении шероховатости. В ходе анализа экспериментальных данных было установлено, что при воздействии гелиевой плазмой рекомендуется выбирать параметры, соответствующие поглощенной энергии равной 30-40 Дж/см². При данном значении тепловой нагрузки и длительности импульса температура поверхности достигает примерно 960-1300 °С.

Кроме того, в рамках исследования влияния воздействия ИПП на характеристики стали ШХ15 проведены испытания с различным количеством импульсов. Результаты измерения микротвердости представлены на рис.6. Экспе-

римент осуществлялся при значениях $Q = 45$ Дж/см², плазмообразующий газ – гелий. В результате выяснено, что при возрастании количества импульсов от 1 до 15 происходит снижение микротвердости в пределах 25 % (от 945 до 700 HV). Согласно полученным результатам, шероховатость при данном режиме хаотично изменяется в пределах от 10 до 40 %. Для установления точной зависимости R_a от N требуется произвести ряд дополнительных исследований. Однако из имеющихся данных можно сделать вывод о том, что облучение несколькими импульсами нецелесообразно, так как в ходе увеличения этого параметра отмечается уменьшение микротвердости.

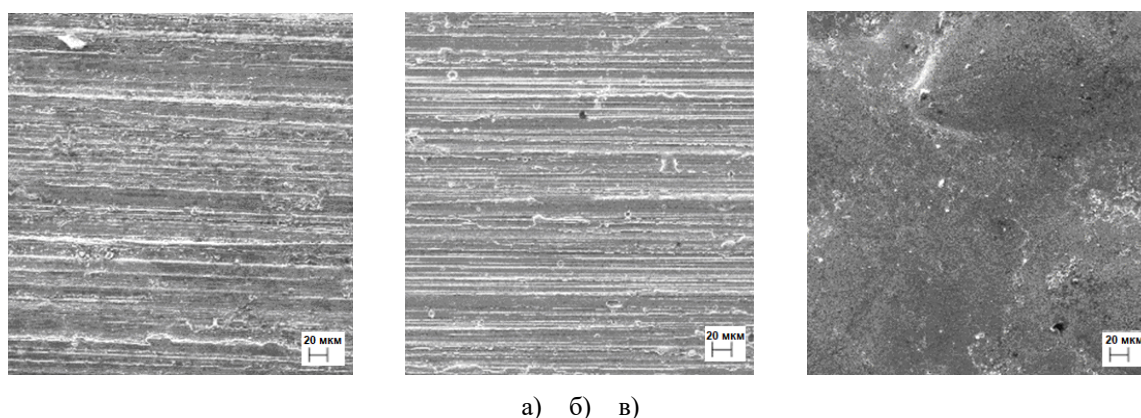


Рис.5. СЭМ-изображения поверхности после обработки ИПП при различных режимах: а – $Q < 30$ Дж/см²; б – $30 < Q < 45$ Дж/см²; в – $Q > 45$ Дж/см²

Fig.5. SEM images of the surface after IPP treatment under different modes: а – $Q < 30$ J/cm²; б – $30 < Q < 45$ J/cm²; в – $Q > 45$ J/cm²

На рис.7 представлены результаты РФА для образцов, облученных различным количеством импульсов (от 1 до 10). Процессы, наблюдаемые при данных режимах обработки, схожи с ранее изложенными для разной тепло-

вой нагрузки. Также отмечается уширение линии и уменьшение интенсивности для всех фаз, вызванное изменением размеров структурных составляющих с увеличением числа импульсов [15]. Наблюдаемая динамика увеличения со-

держания остаточного аустенита может быть объяснена тем, что порционный подвод тепла к поверхности образца обеспечивает стабилизацию $A_{ост}$ за счет наклепа [16]. Твердость сталей складывается из количества и твердости фазовых составляющих [17]. Увеличение доли остаточного аустенита, обладающего меньшим показателем HV, приводит к снижению общего значения данной характеристики.

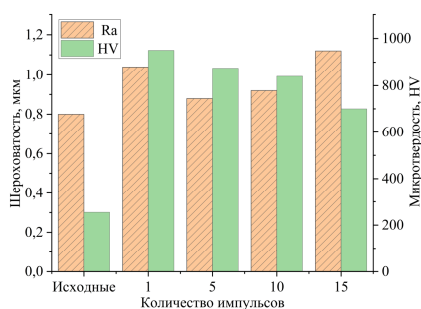


Рис.6. Зависимость микротвердости и шероховатости от количества импульсов гелиевой плазмы

Fig.6. Dependence of microhardness and roughness on the number of helium plasma pulses

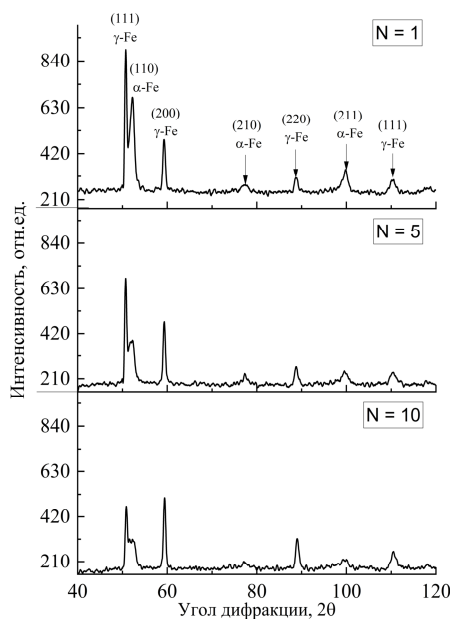


Рис.7. РФА образцов, облученных различным количеством импульсов

Fig.7. XPA of samples irradiated with different number of pulses

Таким образом, предпочтительны режимы с одинарными импульсами, так как в результате обнаруживается увеличение микротвердости модифицированного слоя примерно в 4 раза с увеличением шероховатости до 25 %. Также

полученные результаты указывают на то, что верхний диапазон оптимальных режимов обработки по Q может быть расширен до 45 Дж/см².

Заключение

В результате исследования установлено:

- применение ИПП обработки позволяет получать микротвердость порядка 1050 НВ, что в 4 раза больше исходного. При этом увеличение тепловой нагрузки приводит к снижению данного показателя ввиду повышения доли остаточного аустенита в фазовом составе;
- увеличение Q до 50 Дж/см² приводит к резкому росту шероховатости, связанного с движением расплавленных поверхностных слоев под действием плазмы;
- количество импульсов напрямую влияет на микротвердость: за счет стабилизации остаточного аустенита значение данной характеристики снижается с увеличением числа выстрелов;
- варьирование числа импульсов сопровождается хаотичным изменением шероховатости.

Таким образом, в ходе ИПП обработки гелиевой плазмой значительного повышения микротвердости без существенного изменения шероховатости удается достичь при $Q = 30-45$ Дж/см² единичным импульсом. Обработка ИПП при данных режимах может продлить ресурс изделий из конструкционной стали ШХ15, а также расширить возможности в их эксплуатации.

Список литературы

1. Зубченко А.С. Марочник сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 2011. 782 с.
2. ГОСТ 3722-2014. Подшипники качения. Шарика стальные.
3. Водозова Г.С., Жданов П.А., Ливанова О.В., Филиппов Г.А., Белоусов Г.С. Структура и механические свойства среднеуглеродистой подшипниковой стали // Технология колесных и гусеничных машин. 2013. № 6. С. 45–48.
4. Протасевич В.Ф., Стасевич Г.В., Басалай И.А. Влияние термической обработки на свойства боридного слоя на цементованной малоуглеродистой стали // Металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов. Минск: БНТУ, 2011. Вып. 33, Ч. 2. С. 161–172.
5. Наседкина Я.И., Караваева М.В., Кайбышев О.А. Влияние комбинированной термо-

механической обработки на структуру и механические свойства высокоуглеродистой подшипниковой стали // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2012. Т. 16, № 5(50). С. 145–148.

6. Малькова Н.Ю. Недостатки процессов и перспективные способы химико-термической обработки // Успехи современного естествознания. 2007. № 12. С. 106–107.

7. Иващенко С.А., Койда С.Г. Влияние ионной обработки на изменение исходной шероховатости поверхности образцов из сплава Д16Т // Наука и техника. 2010. № 5. С. 14–17.

8. Кацуба И.С., Перинская И.В. Влияние лазерной импульсной обработки на шероховатость поверхности хромоникелевой стали // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. 2022. С. 83–88.

9. Ковалева М.Г., Прозорова М.С., Арсенко М.Ю., Новиков В.Ю., Вагина О.Н., Мамунин К.Н., Алтухов А.Ю. Структура и износостойкость твердосплавных нанокпозиционных покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\text{NiCr}$ после импульсной плазменной обработки // Физика и технология наноматериалов и структур. 2017. С. 231–237.

10. Коваленко Д.В., Климов Н.С., Житлухин А.М., Музыченко А.Д., Подковыров В.Л., Сафронов В.М., Ярошевская А.Д. Получение потоков аргоновой плазмы и преобразование их энергии в излучение на установке КСПУ-Т для моделирования радиационных нагрузок, характерных для ослабленного срыва ИТЭР // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2014. Т. 37, № 4. С. 39–48.

11. Кутуков А.К., Данилина Н.А., Панин С.Е., Гапонова В.В. Определение оптимальных условий упрочнения импульсными плазменными потоками низколегированных конструкционных сталей с различным содержанием углерода // Упрочняющие технологии и покрытия. 2023. Т. 19, № 1(217). С. 30–35.

12. Мартыненко Ю.В. Эрозия металла при воздействии плазменных потоков, характерных для переходных режимов ИТЭР // В сборнике материалов XVIII конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью». М.: НИЯУ МИФИ, 2015. С. 76–79.

13. Овчинников В.В. Металловедение: учебник. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2020. 320 с.

14. Филиппов М.А., Гервасьев М.А., Худорожкова Ю.В., Легчило В.В. Влияние температуры закалки на фазовый состав, структуру и износостойкость стали 150ХНМ // Известия

высших учебных заведений. Черная металлургия. 2015. Т. 56, № 11. С. 55–58.

15. Жукешов А.М., Габдуллина А.Т., Пак А.Т., Амренова А.У. Структурирование поверхности металлов под воздействием импульсных потоков плазмы // Вестник КазНУ. Серия физическая. 2010. № 2. С. 33.

16. Созыкина А.С. Моделирование превращений при аустенитизации и закалке и прогнозирование твердости высокохромистых сталей и чугунов на основе термодинамических и кинетических расчетов: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Челябинск, 2018. С. 41–42.

17. Счастливец В.М., Калетина Ю.В., Фокина Е.А., Калетин А.Ю. О роли остаточного аустенита в структуре легированных сталей и влиянии на него внешних воздействий // Физика металлов и металловедение. 2014. Т. 115, № 9. С. 962–962.

Информация об авторах

А. К. Кутуков – младший научный сотрудник АО «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований».

А. А. Сергеечев – инженер АО «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований».

М. А. Миллер – инженер АО «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований».

В. В. Гапонова – стажер АО «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований».

References

1. Zubchenko, A. S. (2011). Marker of steels and alloys. P. 782. (In Russ.).

2. GOST 3722-2014. Rolling bearings. Steel balls. (In Russ.).

3. Vodovozova, G. S., Belousov, G. S., Filippov, G. A., Livanova, O. V. & Zhdanov, P. A. Structure and mechanical properties of medium-carbon bearing steel. *Technology of wheels and tracked machines*, (6), 45–48. (In Russ.).

4. Protasevich, V. F., Stasevich, G. V. & Basalai, I. A. (2011). Influence of heat treatment on the properties of the boride layer on case-hardened mild steel. *Metallurgy: republican interdepartmental*

- tal collection of scientific papers, 33(2), 161–172. (In Russ.).
5. Nasedkina, Ya. I., Karavaeva, M. V. & Kaibyshev, O. A. (2012). Influence of combined thermomechanical treatment on the structure and mechanical properties of high-carbon bearing steel. *Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*, 16(5(50)), 145–148. (In Russ.).
6. Malkova, N. Yu. (2007). Disadvantages of processes and promising methods of chemical-thermal treatment. *Successes of modern natural science*, (12), 106–107. (In Russ.).
7. Ivashchenko, S. A. & Koida, S. G. (2010). Influence of ion treatment on the change in the initial surface roughness of samples from D16T alloy. *Science and Technology*, (5), 14–17.
8. Katsuba, I. S. & Perinskaya, I. V. (2022). Influence of laser pulsed processing on the surface roughness of chromonikel steel. *In Prospects for the development of processing technologies and equipment in mechanical engineering*, 83–88. (In Russ.).
9. Kovaleva, M. G., Prozorova, M. S., Arseenko, M. Yu., Novikov, V. Yu., Vagina, O. N., Mamunin, K. N. & Altukhov, A. Yu. (2017). Structure and wear resistance of Cr_3C_2 -25NiCr hardalloy nanocomposite coatings after pulsed plasma treatment. *In Physics and Technology of Nanomaterials and Structures*, 231–237. (In Russ.).
10. Kovalenko, D. V., Klimov, N. S., Zhitlukhin, A. M., Muzychenko, A. D., Podkovyrov, V. L., Safronov, V. M., & Yaroshevskaya, A. D. (2014). Obtaining argon plasma flows and converting their energy into radiation at the KSPU-T facility for modeling radiation loads characteristic of a weakened ITER disruption. *VANT. Ser. Thermonuclear Fusion*, 37(4), 39. (In Russ.).
11. Kutukov, A. K., Danilina, N. A., Panin, S. E. & Gaponova, V. V. (2023). Strengthening technologies and coatings. *Reinforcing technologies and coatings*, 19(1), 30–35. (In Russ.).
12. Martynenko, Yu. V. (2015). Eroziya metalla pri vozdeystvii plazmennyykh potokov, kharakternykh dlya perekhodnykh rezhimov ITER. *V sbornike materialov XVIII konferentsii «Vzaimodeystviye plazmy s poverkhnost'yu»*. M.: NIYAU MI-FI. P. 76–79. (In Russ.).
13. Ovchinnikov, V. V. (2020). *Metallovedeniye: uchebnik*. M.: FORUM: INFRA-M. P. 320. (In Russ.).
14. Filippov, M. A., Gervasiev, M. A., Khudorozhkova, Yu. V., & Legchilo, V. V. (2015). Effect of hardening temperature on the phase composition, structure and wear resistance of 150KhNM steel. News of higher educational institutions. *Ferrous Metallurgy*, 56(11), 55–58. (In Russ.).
15. Zhukeshov, A. M., Gabdullina, A. T., Pak, S. P. & Amrenova, A. U. (2018). Structuring of the metal surface under the influence of pulsed plasma flows. *Herald. Series Physical (VKF)*, 33(2), 8–14. (In Russ.).
16. Sozykina, A. S. (2018). Modelirovaniye prevrashcheniy pri austenitizatsii i zakalke i prognozirovaniye tverdosti vysokokhromistyykh staley i chugunov na osnove termodinamicheskikh i kineticheskikh raschetov: dis. na soiskaniye uchenoy stepeni kand. tekhn. nauk. Chelyabinsk. P. 41–42. (In Russ.).
17. Schastlivtsev, V. M., Kaletina, Yu. V., Fokina, E. A. & Kaletin, A. Yu. (2014). On the role of residual austenite in the structure of alloyed steels and the influence of external influences on it. *Physics of Metals and Metal Science*, 115(9), 962–962. (In Russ.).

Information about the authors

A. K. Kutukov – Junior Researcher, JSC «State Research Center of the Russian Federation Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research».

A. A. Sergeev – Engineer, JSC «State Research Center of the Russian Federation Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research».

M. A. Miller – Engineer, JSC «State Research Center of the Russian Federation Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research».

V. V. Gaponova – Trainee, JSC «State Research Center of the Russian Federation Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research».

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 08.06.2023; одобрена после рецензирования 04.07.2023; принята к публикации 15.07.2023.

The article was received by the editorial board on 08 June 23; approved after reviewing 04 July 23; accepted for publication 15 July 23.