

Л. Л. Сотник¹, кандидат технических наук, доцент,
И. А. Богданович², кандидат технических наук, доцент,
А. В. Малевич³, В. В. Малеронок⁴, кандидат технических наук, доцент
^{1, 2, 3}Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21,
225404 Барановичи, Республика Беларусь, ¹sotnikleonidtm@gmail.com
⁴Учреждение образования «Белорусская государственная академия авиации», ул. Уборевича, 77,
220096 Минск, Республика Беларусь

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ МАШИН И РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ КОМБИНИРОВАННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Статья посвящена актуальной проблеме обеспечения надежности и долговечности металлических изделий и инструмента, эксплуатируемых в условиях интенсивного триботехнического нагружения и циклических температурных воздействий. Проведен системный анализ фундаментальных механизмов упрочнения поверхностных слоев, включая субструктурное, твердорастворное, поликристаллическое и дисперсионное упрочнение. Рассмотрены и классифицированы современные технологии модификации свойств материалов: химико-термическая обработка (азотирование, борирование), высокоэнергетические методы (лазерное, плазменное, электронно-лучевое воздействие), магнитно-импульсная обработка, а также нанесение наноструктурированных покрытий (PVD, CVD). Особое внимание уделено перспективам развития гибридных и комбинированных технологий (Duplex Treatment), позволяющих достичь синергетического эффекта и существенно повысить износостойкость. Обоснована необходимость перехода от традиционных методов к интеллектуальным. Сделан вывод о том, что рациональный подбор методов упрочнения требует учета взаимосвязи параметров энергетического воздействия и условий эксплуатации для максимизации ресурса машиностроительной продукции.

Ключевые слова: упрочнение поверхностей; износостойкость; машиностроение; химико-термическая обработка; высокоэнергетические методы; наноструктурированные покрытия; микроструктура; гибридные технологии.

Библиогр.: 63 назв.

L. L. Sotnik¹, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
I. A. Bogdanovich², PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
A. V. Malevich³, V. V. Maleronok⁴, PhD in Technical Sciences, Associate Professor
^{1, 2, 3}Institution of Education "Baranavichy State University", 21 Voykova Str., 225404 Baranavichy,
the Republic of Belarus, ¹sotnikleonidtm@gmail.com
⁴Institution of Education "Belarusian State Aviation Academy", 77 Ubovichy Str., 220096 Minsk,
the Republic of Belarus

PROSPECTS FOR DEVELOPING METHODS TO IMPROVE THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF MACHINE PARTS AND CUTTING TOOLS THROUGH COMBINED INFLUENCE

The article is devoted to the actual problem of ensuring the reliability and durability of metal products and tools operated under conditions of intensive tribotechnical loading and cyclic temperature effects. A systematic analysis of the fundamental mechanisms of surface layer hardening, including substructural, solid-solution, polycrystalline, and dispersion hardening, has been carried out. Modern technologies for modifying the properties of materials are considered and classified: chemical-thermal treatment (nitriding, boriding), high-energy methods (laser, plasma, and electron-beam treatment), magnetic-pulse treatment, and the application of nanostructured coatings (PVD, CVD). Special attention is paid to the prospects for the development of hybrid and combined technologies (Duplex Treatment), which allow for a synergistic effect and significantly increase wear resistance. The necessity of transitioning from traditional methods to intelligent methods is substantiated. The conclusion is that the rational selection of hardening methods requires taking into account the relationship between the energy impact parameters and operating conditions in order to maximize the resource of engineering products.

Key words: surface hardening; wear resistance; mechanical engineering; chemical-thermal treatment; high-energy methods; nanostructured coatings; microstructure; hybrid technologies.

Ref.: 63 titles.

Введение. Обеспечение надежности и долговечности деталей машин и инструмента, работающих в условиях интенсивного триботехнического нагружения, циклических температурных воздействий и прерывистого контакта, является фундаментальной задачей современного машиностроения [1—5]. Одним из наиболее эффективных векторов совершенствования функциональных характеристик таких объектов выступает направленная модификация их структуры с применением высокоэнергетических упрочняющих технологий [6; 7]. Современные методы воздействия на рабочие поверхности, несмотря на существенные различия в используемых физических принципах (лазерное излучение, плазменные потоки, ультразвуковая кавитация, ионная имплантация) и средах обработки (вакуум, инертные или химически активные газы), направлены на формирование градиентных структур с повышенным комплексом физико-механических свойств [1; 8].

С позиций фундаментального металловедения упрочнение поверхностного слоя деталей машин и инструмента обеспечивается четырьмя базовыми механизмами либо их синергетической комбинацией [9]:

1) *субструктурное упрочнение*, достигаемое за счет генерации в кристаллической решетке металла высокой плотности линейных дефектов — дислокаций (при плотностях, достигающих $10^{-6} \dots 10^{-7} \text{ м}^{-2}$ [9; 10]. Преднамеренное искажение кристаллической решетки создает энергетические барьеры для движения дислокаций, что повышает сопротивляемость материала пластической деформации и износу;

2) *твердорастворное упрочнение*, основанное на модификации параметров кристаллической решетки матрицы при внедрении или замещении атомами легирующих элементов, что приводит к возникновению локальных полей напряжений и росту микротвердости [11];

3) *поликристаллическое (зернограничное) упрочнение*, реализуемое путем измельчения зеренной структуры металла до субмикронного и нанокристаллического уровней, что увеличивает долю межзеренных границ и препятствует распространению усталостных трещин [12; 13];

4) *многофазное (дисперсионное) упрочнение*, связанное с формированием в структуре инструментальных и конструкционных материалов гетерофазных композиций и выделением мелкодисперсных упрочняющих фаз (нитридов, карбидов, интерметаллидов), блокирующих линии скольжения [14; 15].

Эффективность эксплуатации металлического инструмента и деталей машин определяется их способностью сохранять заданную геометрию (стойкостью) и обеспечивать требуемое качество обрабатываемой поверхности или функционального контакта. Все известные механизмы упрочнения базируются на структурно-фазовых и дислокационных превращениях в твердом теле. Целенаправленные изменения в приповерхностном слое трансформируют прочностные свойства изделия в целом, позволяя достичь существенного прироста износостойкости как при использовании традиционных термических методов, так и при применении инновационных плазменных и лазерных технологических процессов [7; 16; 17].

В процессе энергетической модификации металлов (тепловой, световой энергией или потоками заряженных частиц) часть поглощенной энергии преобразуется во внутреннюю энергию системы, воздействуя на зерна, дислокации и дефекты кристаллической структуры. Итоговое состояние упрочненных слоев характеризуется величиной и знаком остаточных напряжений, степенью дефектности фаз и характером микроструктурных изменений [6; 18].

Оптимизация таких факторов, как снижение коэффициента трения в зоне контакта, повышение теплостойкости и твердости поверхностей, а также уменьшение адгезионного взаимодействия с контртелом, определяет итоговую результативность метода упрочнения [19—21]. Технологии, основанные на синтезе функциональных покрытий, обеспечивают дополнительную защиту основы инструмента и деталей от высокотемпературной эрозии и химической деструкции [22; 23].

Несмотря на наличие широкого спектра классификаций методов упрочнения металлических материалов [24—27], большинство из них не учитывают взаимосвязь между параметрами энергетического воздействия и достигаемыми эксплуатационными свойствами изделий. Рациональный подбор режимов упрочняющей обработки в сочетании с условиями эксплуатации остается сложной многофакторной задачей, требующей глубокого анализа контактного взаимодействия и структурной стабильности упрочненных поверхностей [2; 25].

Методология и методы исследования. *Анализ и систематизация методов упрочнения материалов и инструмента в современном машиностроении.* В работах профильных материаловедческих центров подчеркивается, что ресурс деталей машин и инструмента лимитируется не только объемными свойствами материала, но и качеством поверхностного слоя. Переход к комплексной инженерии поверхности является базовым условием создания конкурентоспособной продукции и обеспечения технологического суверенитета в современном машиностроении [29—31]. В настоящей работе представлен краткий обзор существующих методов упрочнения деталей машин и инструмента. Исследование не претендует на исчерпывающий анализ всех известных технологий, а акцентирует внимание на перспективах разработки методов повышения эксплуатационных характеристик посредством комбинированных воздействий.

1. Химико-термическое упрочнение и ионная модификация. Химико-термическая обработка (ХТО) остается доминирующим методом создания износостойких слоев значительной глубины (до 1 мм). Фундаментальные основы ХТО получили развитие в современных ионно-вакуумных процессах [32].

Ионно-плазменное азотирование (далее — ИПА): в ходе исследований механизмов формирования нитридных зон в легированных сталях установлено, что управление параметрами плазменного разряда и плотностью ионного тока позволяет целенаправленно изменять фазовый состав диффузионного слоя [33—36]. Использование безводородных аргоно-азотных сред позволяет избежать наводороживания инструментальных сталей, что критично для предотвращения хрупкого разрушения режущих кромок [35].

Интенсификация процессов: применение методов циклического азотирования с осциллирующим потенциалом позволяет сокращать время обработки в 1,5...2,0 раза при сохранении требуемых прочностных характеристик [37].

Диффузионное борирование: результаты промышленной эксплуатации подтверждают, что борирование в порошковых средах является наиболее эффективным методом защиты штампового инструмента от интенсивного абразивного износа [38—40].

2. Высокотермические методы обработки. Использование концентрированных потоков энергии (лазер, электронный луч, плазма) позволяет реализовывать сверхбыструю закалку и локальное модифицирование поверхности без термических деформаций основы [41—44].

Лазерное упрочнение: лазерное воздействие приводит к образованию специфических дислокационных структур, повышающих микротвердость поверхности до 10...12 ГПа [40; 41]. Экстремальные скорости охлаждения при такой обработке позволяют получать наноструктурированные фазы мартенсита [43].

Плазменные технологии: разработаны научные основы создания композиционных защитных покрытий на базе самофлюсующихся сплавов. Метод плазменного напыления с последующим оплавлением позволяет восстанавливать геометрию и повышать ресурс дорогостоящего прессового инструмента [44—46].

3. Магнитно-импульсное упрочнение и деформационное воздействие. Магнитно-импульсная обработка (далее — МИО) — высокоскоростной метод, основанный на преобразовании энергии электромагнитного поля в ударные волны. Данное направление активно развивается в научно-исследовательских институтах физико-технического профиля.

Механизм воздействия: МИО инициирует глубокую перестройку субструктуры материала. Импульсное воздействие на быстрорежущие стали приводит к измельчению карбидной фазы и блоков мозаики, повышая красностойкость инструмента на 15...20 % [3; 47—49].

Упрочнение инструментальных сборок: особенностью МИО является возможность упрочнения инструмента в сборе (например, сборных фрез), так как импульсное поле создает благоприятные остаточные напряжения сжатия в зонах концентрации нагрузок [50].

4. *Наноструктурированные покрытия и комбинированные методы.* Нанесение тонкопленочных покрытий методами PVD и CVD является стандартом для режущего инструмента. Однако для работы в экстремальных условиях необходима синергия физико-химических воздействий.

Многослойные системы (PVD): разработка архитектур наноструктурированных пленок (Ti-Al-N, Ti-Zr-N) позволяет эффективно блокировать распространение микротрещин [51—55].

Комбинированные технологии (Duplex Treatment): сочетание «ионное азотирование + PVD-напыление» предотвращает эффект «продавливания» твердого покрытия при контакте с обрабатываемым материалом, увеличивая адгезионную прочность до 80...100 Н. Это обеспечивает рост стойкости штампов в 5...8 раз [56—58].

Результаты исследования и их обсуждение. Особый интерес представляет сочетание ИПА — метода химико-термической обработки, а также МИО — метода энергетического воздействия. Исследования показывают, что внешние энергетические поля могут усиливать диффузионные процессы и менять структуру азотированного слоя [44; 48].

Основная проблема ИПА инструментальных сталей, например Р6М5 или 4Х5МФС, — охрупчивание поверхности при формировании сплошной нитридной зоны. Но точный контроль параметров плазмы, особенно при низких температурах около (400 °С), помогает свести эти эффекты к минимуму и не допустить чрезмерного роста зерна [59].

Магнитно-импульсная обработка действует через вихревые токи и пондеромоторные силы. Это приводит к перестройке дислокаций. МИО может активировать диффузию перед азотированием и снижать напряжения после него. Интеграция ИПА с ионно-лучевым напылением углеродных слоев демонстрирует высокий потенциал в формировании многофункциональных покрытий на сталях вроде AISI H13 [60]. В Беларуси ключевой вклад в совершенствование импульсных технологий внесли ученые БНТУ и Физико-технического института НАН Беларуси. Их исследования под руководством ведущих профессоров национальной научной школы однозначно показывают: предварительная пластическая деформация либо импульсные воздействия генерируют каналы быстрой диффузии азота [3; 44].

Модификация структурно-фазового состояния сталей ионно-плазменными методами даёт оптимальный баланс твердости и вязкости [44].

Российские группы работают с ИПА в тлеющем разряде с наложением магнитных полей [33]. Показано, что магнитное поле стабилизирует разряд и увеличивает плотность ионного тока. За счёт этого время насыщения сокращается в 1,5...2,0 раза, а качество поверхностного слоя улучшается.

Зарубежные исследования делают акцент на управлении фазовым составом диффузионного слоя. Для максимальной коррозионной стойкости и твердости стремятся получить монофазный слой ϵ -нитрида. Добиваются этого изменением содержания углерода в плазменной среде [61].

Для быстрорежущих сталей критична адгезия слоя к подложке. Эксперименты показывают прямую связь между временем импульсного воздействия плазмы и нанотвердостью поверхности. Увеличение времени обработки до 3,5 ч заметно повышает эксплуатационные характеристики инструмента [62].

Анализ сочетаний воздействий (МИО и ИПА).

1. Предварительная МИО перед ИПА. Такой сценарий рассматривают как способ активации поверхности. Магнитный импульс создаёт высокую плотность дефектов кристаллической решётки — вакансий, дислокаций. При последующем ИПА атомы азота диффундируют по этим дефектам гораздо быстрее. В итоге можно получить упрочнённый слой большей глубины [3; 63].

2. Последовательность ИПА + МИО. Азотированный слой очень твёрдый, но склонен к микротрещинам при динамических нагрузках. МИО после азотирования играет роль «магнитного отпуска». Импульсное поле способствует перераспределению остаточных растягивающих напряжений в сжимающие [3; 44; 63]. Это сильно повышает предел выносливости инструмента.

Заключение. Подбор метода упрочнения — сложная многофакторная задача. Существующие классификации не всегда систематизируют параметры воздействий и получаемые свойства, поэтому выбор для производства затруднён [9]. У каждого метода свои плюсы и минусы. Покрытия дают хороший барьер, но они дорогие и хрупкие. Лазерная обработка даёт высокую твердость, но есть риск трещин. Ультразвуковая и дробеструйная обработки создают сжимающие напряжения, но они ограничены по глубине. Оптимальные поверхностные свойства обычно получают сочетанием режимов эксплуатации и упрочняющей обработки [2].

Проведенный анализ подтверждает, что потенциал традиционных методов упрочнения близок к исчерпанию. Дальнейший рост эффективности металлообработки связан с внедрением гибридных технологий, объединяющих диффузионное насыщение, импульсное воздействие и наноструктурирование. Результаты исследований белорусских и российских ученых обеспечивают необходимый фундамент для технологического развития машиностроения.

Список цитируемых источников

1. *Тюрин, Ю. Н.* Плазменные упрочняющие технологии / Ю. Н. Тюрин, М. Л. Жадкевич. — Киев : Наук. думка, 2008. — 218 с.
2. *Григорьев, С. Н.* Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента / С. Н. Григорьев, В. П. Табаков, М. А. Волосова. — Старый Оскол : ТНТ, 2011. — 268 с.
3. *Белый, А. В.* Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев / А. В. Белый, Г. Д. Карпенко, Н. К. Мышкин. — М. : Машиностроение, 1991. — 208 с.
4. Теория и технология азотирования / Ю. М. Лахтин [и др.]. — М. : Metallurgia, 1991. — 320 с.
5. Химико-термическая обработка металлов и сплавов : справочник / Г. В. Борисенко [и др.]. — М. : Metallurgia, 1981. — 424 с.
6. *Жигалов, А. Н.* Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания : монография / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег. — Могилев : МГУП, 2019. — 213 с.
7. *Лощак, М. Г.* Упрочнение твердых сплавов / М. Г. Лощак, Л. И. Александрова. — Киев : Наук. думка, 1977. — 148 с.
8. *Жигалов, А. Н.* Методы упрочнения твердосплавного инструмента, их достоинства и недостатки / А. Н. Жигалов, А. А. Жолобов, О. Н. Кляус // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 25—26 апр. 2019 г. / Бел.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. — Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2019. — С. 39—40.
9. *Федорченко, И. М.* Основы порошковой металлургии / И. М. Федорченко, Р. Л. Андриевский. — Киев : АИ УССР, 1963. — 420 с.
10. Dislocation Entropy: Temperature and Density Dependence / J. S. Okst [et al.] // arXiv.org. — 2026. — URL: <https://arxiv.org/abs/> (date of access: 25.03.2026).
11. The Diffusion-Hardening Effect on the Technological Properties of High-Temperature Steel / O. G. Sitalo [et al.] // arXiv.org. — 2018. — URL: <https://arxiv.org/abs/> (date of access: 25.03.2026).
12. Патент RU 2354749. Способ получения наноструктурированных функционально-градиентных износостойких покрытий : опубл. 10.05.2009 / Горынин И. В., Фармаковский Б. В., Геращенко Д. А., Васильев А. Ф.
13. *Вохидов, А. С.* Нанология сегодня и завтра / А. С. Вохидов, Л. О. Добровольский // Станочный парк. — 2009. — № 5 (61). — С. 38—42.
14. Nanosized precipitates in H13 tool steel low temperature plasma nitriding / R. S. S. de Oliveira [et al.] // arXiv.org. — 2012. — URL: <https://arxiv.org/abs/> (date of access: 25.03.2026).
15. A multidisciplinary approach to study precipitation kinetics and hardening in an Al-4Cu (wt. %) alloy / J. M. S. de Oliveira [et al.] // arXiv.org. — 2018. — URL: <https://arxiv.org/abs/> (date of access: 25.03.2026).
16. *Воронцов, П. А.* О целесообразности импульсно-лазерного упрочнения металлокерамических твёрдых сплавов / П. А. Воронцов, В. М. Гончаров, М. Н. Шагров // Сб. науч. тр. СевКавГТУ. Серия «Естественнонаучная». — 2005. — № 1. — С. 77—80.

17. *Осколкова, Т. Н.* Упрочнение поверхности карбидовольфрамового твердого сплава электровзрывной обработкой / Т. Н. Осколкова, Е. А. Будовских // Вести высших учебных заведений Черноземья. — 2011. — № 1 (23). — С. 88—92.
18. Plackett-Burman experimental design for pulsed-DC-plasma deposition of DLC coatings / G. G. Fuentes [et al.] // arXiv.org. — 2015. — URL: <https://arxiv.org/abs/> (date of access: 25.03.2026).
19. *Табаков, В. П.* Повышение эффективности режущего инструмента путем направленного изменения параметров структуры и свойств материала износостойкого покрытия : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08 / В. П. Табаков. — Ульяновск, 1992. — 641 с.
20. *Табаков, В. П.* Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями в условиях стесненного резания / В. П. Табаков, Д. И. Сагитов. — Ульяновск : УлГТУ, 2015. — 179 с.
21. Решение проблем при фрезеровании // Sandvik Coromant. — URL: <https://www.sandvik-coromant.com/ru> (дата обращения: 24.03.2026).
22. *Болотников, Г. В.* Современные покрытия для твердосплавного режущего инструмента / Г. В. Болотников // СТИН. — 1994. — № 4. — С. 33—37.
23. Diamond-Like Carbon Coatings on Plasma Nitrided M2 Steel: effect of deposition parameters on adhesion properties / M. R. S. de Oliveira [et al.] // arXiv.org. — 2018. — URL: <https://arxiv.org/abs/> (date of access: 25.03.2026).
24. *Григорьев, С. Н.* Методы повышения стойкости режущего инструмента / С. Н. Григорьев. — М. : Машиностроение, 2009. — 368 с.
25. *Волосова, М. А.* Систематизация методов нанесения покрытий и модификации рабочих поверхностей режущего инструмента и алгоритм их выбора / М. А. Волосова, А. А. Туманов // Вестн. МГТУ Станкин. — 2011. — № 3 (15). — С. 78—83.
26. Поверхностное упрочнение режущего инструмента. — URL: <http://sverlite.ru/?p=2537> (дата обращения: 23.03.2026).
27. *Степанова, Т. Ю.* Технологии поверхностного упрочнения деталей машин : учеб. пособие / Т. Ю. Степанова. — Иваново : Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2009. — 64 с.
28. Модифицирование материалов и покрытий наноразмерными алмазосодержащими добавками / П. А. Витязь, В. И. Жорник, В. А. Кукареко [и др.]. — Мн. : Бел. наука, 2011. — 522 с.
29. Технологии конструкционных наноструктурных материалов и покрытий / П. А. Витязь, А. Ф. Ильющенко, М. Л. Хейфец [и др.] ; под общ. ред. П. А. Витязя и К. А. Солнцева. — Мн. : Бел. наука, 2011. — 283 с.
30. *Хейфец, М. Л.* Проектирование процессов комбинированной обработки / М. Л. Хейфец. — М. : Машиностроение, 2005. — 272 с.
31. Анализ свойств отношений технологических решений при проектировании комбинированных методов обработки материалов / П. И. Ящерицын [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. — 2001. — Т. 45, № 4. — С. 106—109.
32. Химико-термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин, Б. Н. Арзамасов. — М. : Металлургия, 1985. — 256 с.
33. *Достанко, А. Н.* Модификация поверхности твердых тел в неравновесной газоразрядной плазме / А. Н. Достанко, М. Н. Босяков, С. А. Кухарев. — Мн. : АрмиТаМаркетинг : Менеджмент, 1996. — 95 с.
34. *Тихонов, А. К.* Основные направления развития азотирования в мире / А. К. Тихонов, Н. В. Богданова // Материаловедение. — 2001. — № 3. — С. 53—56.
35. *Босяков, М. Н.* Газодинамические характеристики тлеющего разряда при ионном азотировании / М. Н. Босяков, А. А. Козлов // Наука и техника. — 2018. — Т. 17, № 5. — С. 368—377.
36. *Саханько, С. А.* Технологические особенности ионного азотирования изделий из инструментальных сталей для горячей и холодной обработки / С. А. Саханько, М. Н. Босяков, М. В. Нерода // Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение. — 2018. — № 4 (112). — С. 13—15.
37. Исследование и оптимизация параметров процессов плазменной химико-термической обработки изделий машиностроения / М. Н. Босяков, С. А. Бондаренко, А. С. Бондаренко [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 2 кн. — Мн. : Физ.-техн. ин-т НАН Беларуси, 2021. — С. 81—104.
38. *Кухарева, Н. Г.* Получение высокобористых диффузионных покрытий на углеродистых сталях / Н. Г. Кухарева, С. Н. Петрович, Г. В. Стасевич // Металлургия : Респ. межвед. сб. науч. тр. — Мн. : БНТУ, 2013. — Вып. 34, ч. 2. — С. 9—15.
39. *Лабунец, В. Ф.* Износостойкие боридные покрытия / В. Ф. Лабунец, Л. Г. Ворошнин, М. В. Киндарчук. — Киев : Техника, 1989. — 158 с.
40. Физические основы термоциклического борирования / А. М. Гурьев, Э. В. Козлов, Л. Н. Игнатенко, Н. А. Попова. — Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2000. — 216 с.
41. *Майоров, В. С.* Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / В. С. Майоров, С. В. Майоров, М. Ю. Стернин. — М. : Физ.-мат. лит., 2009. — 664 с.

42. On the formation features, structure, microhardness and tribological behavior of single tracks and coating layers formed by laser cladding of Al-Fe powder bronze / O. G. Devojno, M. A. Kardapolava, N. I. Lutsko, E. Feldshtein // *Surface and Coatings Technology*. — 2019. — Vol. 358. — P. 195—206.
43. Технология формирования износостойких покрытий на железной основе методами лазерной обработки / О. Г. Девойно, М. А. Кардаполова, А. С. Калиниченко [и др.]. — Мн. : Бел. нац. техн. ун-т, 2020. — 280 с.
44. Инженерия поверхностей конструкционных материалов с использованием плазменных и пучковых технологий / А. В. Белый, А. С. Калиниченко, О. Г. Девойно, В. А. Кукареко ; НАН Беларуси, Физ.-техн. ин-т, Объедин. ин-т машиностроения, Бел. нац. техн. ун-т. — Мн. : Бел. наука, 2017. — 457 с.
45. Восстановление износа деталей машин : учебник / В. А. Горохов, О. Г. Девойно, В. П. Иванов [и др.]. — Старый Оскол : Тонкие наукоемкие технологии, 2020. — 380 с.
46. Модификация плазменных износостойких покрытий импульсным лазером / В. А. Оковитый, Ф. И. Пантелеенко, А. И. Шевцов [и др.] // *Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение*. — 2009. — № 4 (58). — С. 49—53.
47. Алифанов, А. В. Механизм упрочнения легированных сталей в импульсном магнитном поле / А. В. Алифанов, Ж. А. Попова, Н. М. Ционенко // *Литье и металлургия*. — 2012. — № 4 (68). — С. 151—155.
48. Магнитострикционный механизм образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии / А. В. Алифанов, Д. А. Ционенко, А. М. Милюкова, Н. М. Ционенко // *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*. — 2016. — № 4. — С. 31—36.
49. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка материалов / А. В. Алифанов, А. М. Милюкова, А. Н. Матяс [и др.] // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 2 кн.* — Мн. : Физ.-техн. ин-т НАН Беларуси, 2021. — С. 127—153.
50. Горчанин, А. И. Повышение эффективности упрочняющей магнитно-импульсной обработки ножей со сложным профилем лезвия / А. И. Горчанин, А. М. Милюкова, А. А. Лях // *Вестник БарГУ. Серия «Технические науки»*. — 2019. — № 7. — С. 43—48.
51. Левашов, Е. А. Многофункциональные наноструктурированные пленки / Е. А. Левашов, Д. В. Штанский // *Успехи химии*. — 2007. — Т. 76, № 5. — С. 501—509.
52. Наноструктурированные и нанокompозитные сверхтвердые покрытия / А. Д. Коратаев, В. Ю. Мошков, С. В. Овчинников [и др.] // *Физическая мезомеханика*. — 2005. — Т. 8, № 5. — С. 103—116.
53. Kivak, T. Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts / T. Kivak // *Measurement*. — 2014. — Vol. 50, no. 1. — P. 19—28.
54. Сравнительный анализ свойств покрытий на основе углерода, полученных различными PVD и CVD методами осаждения / Д. В. Корженко, Ю. Н. Юрьев, Д. Р. Емлин, С. А. Плотников // *Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 30 сент. — 4 окт. 2019 г.* / Нац. исслед. Том. политехн. ун-т. — Томск : Нац. исслед. Том. политехн. ун-т, 2019. — С. 179—180.
55. Acquisition and properties of wear-resistant PVD/CVD coatings on a hard-alloy tool / I. V. Blinkov, V. N. Anikin, M. I. Petrzik [et al.] // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. — 2011. — Vol. 52, no. 1. — P. 109—114.
56. Мицирук, О. М. Гибридные лазерно-плазменные технологии упрочнения / О. М. Мицирук, А. И. Веремейчик, М. В. Нерода // *Актуальные вопросы машиноведения*. — 2023. — Т. 12. — С. 275—278.
57. Сермин, В. Г. Гибридная технология повышения эксплуатационных свойств рабочих поверхностей деталей машин / В. Г. Сермин // *Школа молодых новаторов : сб. науч. ст. 6-й Междунар. науч. конф. Перспектив. разработок молодых ученых : в 3 т., Курск, 16 июня 2025 г.* — Курск : Университет. кн., 2025. — Т. 1. — С. 303—306.
58. Применение гибридных технологий для реновации и повышения ресурса деталей судовых машин и механизмов / А. В. Дудан, Т. В. Ворона, М. С. Агеев, Б. А. Ляшенко // *Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение*. — 2015. — № 4 (94). — С. 18—22.
59. Zagonel, L. F. Microstructure of tool steel after low temperature ion nitriding / L. F. Zagonel, E. J. Mittemeijer, F. Alvarez // *Materials Science and Technology*. — 2009. — Vol. 25, no. 6. — P. 726—732. — DOI: 10.1179/174328408X332780.
60. Zagonel, L. F. Tool steel ion beam assisted nitrocarburization / L. F. Zagonel, F. Alvarez // *Materials Science and Engineering: A*. — 2007. — Vol. 465, no. 1—2. — P. 194—198. — DOI: 10.1016/j.msea.2007.02.048.
61. Effect of Carbon on the Compound Layer Properties of AISI H13 Tool Steel in Pulsed Plasma Nitrocarburizing / R. L. O. Basso, C. A. Figueroa, L. F. Zagonel [et al.] // *Plasma Processes and Polymers*. — 2007. — Vol. 4, Suppl. 1. — P. S728—S731. — DOI: 10.1002/ppap.200731806.
62. Grill, A. Nitriding of AISI M2 tool steel in an inductive r.f. plasma / A. Grill, D. Itzhak // *Thin Solid Films*. — 1983. — Vol. 101. — P. 219—222.
63. Малевич, А. В. Влияние комбинированной обработки ионно-плазменным азотированием и магнитно-импульсной обработкой на макро- и микронапряжения в стали 38Х2МЮА / А. В. Малевич, Л. Л. Сотник, И. А. Богданович // *Вестник БарГУ. Серия «Технические науки»*. — 2025. — № 2 (18). — С. 44—51.

Поступила в редакцию 02.04.2026.