

Антиповская А.И.

Научный руководитель: к.т.н., доцент Яшин А.В.

*Муромский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23  
anndemitale@gmail.ru*

### **Исследование применения аддитивных технологий в изготовлении инструментов**

Современное машиностроение и металлообработка предъявляют высокие требования к инструментам, используемым в различных технологических процессах. Аддитивные технологии открывают новые возможности в изготовлении инструментов для различных методов обработки, позволяя создавать изделия сложной геометрии с высокой точностью и эффективностью производства.

Цель работы: анализ применения аддитивных технологий для изготовления инструментов, используемых при различных методах обработки материалов.

#### **Задачи работы:**

1. Рассмотреть возможности аддитивных технологий в изготовлении инструментов.
2. Оценить преимущества и недостатки применения аддитивных технологий металлорежущем инструменте.
3. Изучить применение аддитивных технологий в электроабразивной обработке.

Аддитивные технологии позволяют создавать инструменты со сложной геометрией, включая внутренние каналы для охлаждения и подачи рабочей среды, конструкции со сменными элементами и сложными профилями. Послойное формирование материала обеспечивает высокую точность и повторяемость изделий, открывая новые возможности для проектирования инструментов, которые невозможно изготовить традиционными методами, такими как фрезерование или литьё. Использование 3D-печати активно внедряется в авиастроении, машиностроении и других отраслях, где важны точность и индивидуальная настройка инструмента под конкретное изделие.

Использование аддитивного метода при производстве металлорежущего инструмента позволяет ускорить разработку конструкций, снизить затраты на производство, повысить виброустойчивость и стойкость инструментов, а также реализовать сложные системы подачи СОЖ. Однако существуют ограничения: внутренняя пористость, необходимость постобработки и прочность изделий примерно на 30% ниже, чем у кованных аналогов. Несмотря на это, экономический эффект проявляется за счёт уменьшения времени на производство и корректировку инструмента, что особенно важно для гибкоструктурного и мелкосерийного производства.

В электроабразивной чистовой обработке аддитивная технология позволяет создавать инструменты с регулируемой подачей токопроводящей рабочей среды через внутренние каналы корпуса, нанесённые послойно. Абразивные гранулы фиксируются на рабочей поверхности корпуса методом вдавливания, что снижает износ инструмента и повышает точность обработки. Такой подход эффективен при чистовой обработке трудных для механической обработки сплавов, тепловых покрытий и сложных профилей, например, пазов систем охлаждения ракетных двигателей или зубьев зубчатых колес.

Аддитивные технологии обеспечивают ускоренное создание инструментов, снижают потребность в правке и заточке, а также позволяют использовать более дешёвые абразивные материалы. Применение таких технологий в гибкоструктурном и мелкосерийном производстве повышает производительность, уменьшает расход дорогого сырья и сокращает время освоения новых изделий. Несмотря на существующие технические ограничения, разработка отечественных 3D-принтеров и универсальных

аддитивных методов делает данное направление перспективным для машиностроения, авиакосмической отрасли и сложного точного производства.

Таким образом, аддитивные технологии существенно повышают эффективность и гибкость производства инструментов.

#### **Литература**

1. Польшин А.А., Грибеников А.Е., Тихонов А.А., Мальцев А.К. Использование аддитивных технологий для изготовления элементов металлорежущего инструмента // Инновационное развитие подъемно-транспортной техники. – Белгород: БелГУТ им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 58–60.

2. Поташникова Н.С., Смоленцев В.П., Поташников М.Г. Аддитивная технология создания инструмента для электроабразивной обработки // Воронежский государственный технический университет, 2023. – С. 1–10.

3. Черкаев А.А., Балабанов И.П. Применение аддитивных технологий для изготовления сложнопрофильных инструментов // Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, Россия, 2023. – С. 1–8.

4. Белякова В.А., Воробьев И.А. Использование аддитивных технологий для изготовления инструмента финишной обработки зубчатых колес // Тульский государственный университет, Россия, 2023. – С. 1–9.

Гудкова С.Е.

Научный руководитель: к.т.н., доцент Яшков В.А.

*Муромский институт (филиал) федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23  
E-mail: gudkovasofya2406@yandex.ru*

### **Исследование тепловых процессов при внутреннем шлифовании**

Задача управления температурой является одной из главных причин по предотвращению термических повреждений, которые негативно сказываются на долговечности и надежности изделий.

Классическим явлением, представляющим наибольший интерес, является "закалка". Это термическое повреждение возникает, когда локальная температура в зоне контакта превышает пороговые значения, приводя к фазовым превращениям в поверхностном слое заготовки

Не менее важной проблемой является формирование остаточных напряжений. Тепловой режим процесса напрямую влияет на их величину и знак. Быстрый нагрев и быстрое охлаждение поверхностного слоя приводят к формированию растягивающих остаточных напряжений, которые являются катастрофическими для усталостной прочности изделия, поскольку они снижают ее

Влияние режимов обработки, таких как скорость вращения шлифовального круга, скорость подачи и глубина резания, является предметом постоянного изучения. Увеличение скорости подачи приводит к существенному снижению температуры в зоне резания, в то время как увеличение глубины резания напротив, приводит к росту тепловыделения. Выбор режимов представляет собой задачу многокритериальной оптимизации, где необходимо найти баланс между производительностью (скоростью подачи), качеством поверхности (ограничением температуры) и стойкостью инструмента.

Одним из самых перспективных направлений инноваций, нацеленных на решение проблемы перегрева, является разработка и применение инструментов с системами внутреннего охлаждения. Концепция заключается в подаче охлаждающей жидкости непосредственно в зону резания через каналы, выполненные внутри корпуса шлифовального круга. Это позволяет значительно повысить эффективность теплоотвода по сравнению с традиционным наружным орошением, когда жидкость попадает в зону контакта с большим запозданием.

В совокупности, анализ показывает, что управление тепловыми процессами — это комплексная задача, требующая системного подхода. Она включает в себя:

1. Оптимизацию режимов обработки: Найденный баланс между скоростью подачи, глубиной резания и скоростью вращения круга для минимизации тепловыделения при сохранении производительности.

2. Разработку инновационных инструментов: Создание шлифовальных кругов с улучшенной геометрией и, что особенно важно, с эффективными системами внутреннего охлаждения.

3. Применение передовых методов анализа: Использование CFD моделирования для проектирования и оптимизации систем охлаждения инструмента и станка.

4. Контроль условий подачи охлаждающей жидкости: Настройка параметров подачи (давление, расход, направление) для максимального эффекта.

Эти направления исследований напрямую ведут к снижению риска термических повреждений, повышению стойкости инструмента, улучшению качества шлифованной поверхности и, в конечном счете, к повышению надежности и срока службы выпускаемых изделий.

### Литература

1. В.А. Сипайлов. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. – М.: Машиностроение, 1978 – 167 с., ил.
2. Guba N., Hüseman T., Heinzl C. Influence of metal working fluid supply conditions on the thermal process limit for grinding of hardened steel // ScienceDirect. 2025. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755581725000392>
3. Wang Z., Sun Z., Huang Y., Yu T., Zhao J. Design and Preparation of a Self-Inhaling Internal Cooling Grinding Wheel with a Leaf Order Arrangement Structure // Applied Sciences. — 2025. — Vol. 15, no. 1. — P. 44. — URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/1/44>

Гурьянов Антон Павлович,

Научный руководитель: к.т.н., доцент Баринов С.В.

*Муромский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»*

*602264, Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23*

*gua798092@gmail.com*

### **Исследование анизотропии механических свойств материалов, полученных в аддитивном производстве**

Аддитивные технологии стремительно внедряются в аэрокосмическую, автомобильную, медицинскую и энергетическую отрасли благодаря возможности изготовления изделий сложной геометрии с высоким уровнем кастомизации. Однако ключевым ограничением, сдерживающим применение аддитивно изготовленных деталей в ответственных конструкциях, является анизотропия механических свойств, обусловленная послойной природой синтеза. Понимание природы анизотропии, методов ее прогнозирования и способов снижения представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

Цель работы анализ механизмов возникновения анизотропии механических свойств материалов, полученных методами аддитивного производства, обзор современных подходов к моделированию и контролю анизотропии для различных классов материалов (металлы, полимеры, композиты, керамика).

В работе выполнен аналитический обзор научной литературы за 2020–2026 гг., включающий исследования микроструктурной эволюции, экспериментальные данные по механическим испытаниям образцов, ориентированных в различных направлениях, а также методы неразрушающего контроля (ультразвуковая диагностика) и конститутивного моделирования (критерии Хилла, Барлата, модели на основе микроструктуры).

Установлено, что анизотропия аддитивно изготовленных материалов формируется под действием трех основных факторов: (1) термическая история процесса (направленные градиенты температур, эпитаксиальный рост колончатых зерен в металлах, ориентация полимерных цепей); (2) наличие межслойных границ с пониженной адгезией и концентраторов напряжений (поры, несплавления); (3) остаточные напряжения, возникающие при быстром охлаждении.

Для металлических материалов (Ti6Al4V, AlSi10Mg) характерна разница прочности при растяжении между вертикальным и горизонтальным направлениями на 10–20 %, обусловленная ориентацией колончатых зерен и текстурой кристаллической решетки. Для полимеров и композитов, получаемых экструзией материала (MEX/FDM), анизотропия определяется углом укладки нити (raster angle) и межслойной диффузией; оптимальные режимы печати (скорость 20–40 мм/мин, толщина слоя 0,2 мм) позволяют минимизировать пористость и повысить межслойную прочность.

Показано, что эффективным методом неразрушающего контроля анизотропии является ультразвуковая диагностика, позволяющая по скоростям распространения продольных и поперечных волн оценить полную матрицу жесткости материала. Предложенный в ряде работ коэффициент анизотропии  $A_g$  демонстрирует высокую корреляцию ( $R=0,97$ ) с амплитудой эхо-сигналов от дефектов.

Установлено, что снижение анизотропии достигается двумя основными путями: (1) оптимизацией параметров процесса (контроль энергозатрат, стратегии сканирования, повышение температуры платформы); (2) пост-термической обработкой (отжиг, горячее изостатическое прессование – HIP), позволяющей снять остаточные напряжения и трансформировать колончатые зерна в равноосные. Перспективным направлением являются

технологии твердофазного аддитивного производства (FSAM, AFSD), в которых отсутствует направленная кристаллизация.

Анизотропия механических свойств является фундаментальной характеристикой материалов, полученных аддитивными технологиями, и требует обязательного учета при проектировании и эксплуатации изделий. Дальнейшее развитие отрасли связано с созданием единых стандартов оценки анизотропии, внедрением цифровых двойников, учитывающих анизотропные свойства на этапе топологической оптимизации, а также развитием гибридных и твердофазных технологий, позволяющих управлять микроструктурой и снижать анизотропию.

#### Литература

1. Статья - Доступ: <https://cyberleninka.ru/article/n/morfologiya-tehnologicheskikh-nesploshnostey-v-strukture-izdeliy-additivnogo-proizvodstva-kak-prichina-anizotropii-ih-fiziko>– Загл. с экрана.
2. А. Н. Чуканов, А. А. Яковенко, Е. В. Цой. Морфология технологических несплошностей в структуре изделий аддитивного производства как причина анизотропии их физикомеханических свойств // Чебышевский сборник, 2023, т. 24, вып. 5, с. 343–356.
3. Дай, С., Чжу, К., Ван, С. и Дэн, З. (2025). Материалы, изготовленные с использованием добавок: критический обзор их анизотропных механических свойств и методов моделирования. Журнал производственных процессов, 141, 789-814. DOI: 10.1016/j.jmapro.2025.02.038
4. Дебрецен, А., Бури, З. и Бодзаш, С. (2026). Связь технологических параметров, структуры и свойств материалов при экструзионном аддитивном производстве полимеров и композитов: обзор. Дебреценский университет.

Молчанов Я.Д.

Научный руководитель: д.т.н., профессор Соловьев Д.Л.

*Муромский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»*

*602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23*

*E-mail: yaroslavmolchanov01@mail.ru*

### **Повышение усталостной долговечности деталей машин упрочняющей обработкой**

В современном машиностроении одной из основных причин выхода из строя ответственных деталей, таких как валы, оси, пружины и зубчатые колёса, является усталостное разрушение. Циклические нагрузки вызывают постепенное накопление повреждений в материале, что приводит к образованию трещин и последующему разрушению детали. Повысить усталостную долговечность без существенного увеличения массы и габаритов изделия можно за счёт применения различных методов упрочняющей обработки: поверхностного пластического деформирования (ППД), дробеструйной обработки, лазерного и плазменного упрочнения, ультразвуковой обработки и других. Несмотря на обилие методов, остаётся актуальной задача выбора оптимальных режимов для конкретных деталей и условий эксплуатации, а также оценки их влияния на структурное состояние материала и поле остаточных напряжений.

Целью данной работы является обоснование и выбор эффективных методов упрочняющей обработки, обеспечивающих максимальное повышение усталостной долговечности типовых деталей машин (на примере валов из среднеуглеродистых и легированных сталей). Для достижения цели в работе были поставлены следующие задачи: анализ существующих методов упрочнения с точки зрения их влияния на усталостные характеристики; экспериментальное исследование влияния режимов поверхностного пластического деформирования (обкатка роликом, дорнование) и комбинированных методов (ППД + лазерная обработка) на микротвёрдость, шероховатость, величину и знак остаточных напряжений; проведение усталостных испытаний образцов и натуральных деталей после различных видов упрочнения; а также разработка рекомендаций по выбору параметров обработки для повышения предела выносливости.

Методы исследования включали металлографический и рентгеноструктурный анализ для оценки глубины наклёпанного слоя и фазового состава, измерение остаточных напряжений методом электрохимического травления с тензометрированием, испытания на усталость по схеме чистого изгиба вращающихся образцов (на машине МУИ-6000) и при циклическом кручении, а также статистическую обработку результатов с использованием пакетов прикладных программ.

Предварительные результаты показали, что оптимальная степень деформации при обкатке роликом для стали 40Х составляет 20–25 %; при этом формируются сжимающие остаточные напряжения до 500 МПа на глубине 0,5–0,7 мм. Установлено, что комбинирование ППД с последующей лазерной закалкой позволяет дополнительно повысить предел выносливости на 35–40 % по сравнению с необработанными образцами (в то время как раздельное применение даёт прирост только 20–25 %). Дробеструйная обработка с интенсивностью 0,4–0,5 мм (по степени прогиба образца) обеспечивает наиболее равномерное поле остаточных напряжений, но уступает обкатке роликом по глубине упрочнённого слоя. Также предложены режимы финишной антифрикционной обработки (ФАО), позволяющие снизить коэффициент концентрации напряжений в местах переходов радиусов.

Полученные результаты расширяют представления о механизмах упрочнения при комбинированной обработке и имеют как научную, так и практическую значимость.

Разработанные рекомендации позволяют целенаправленно назначать технологические режимы для увеличения ресурса деталей, работающих в условиях циклических нагрузок. Внедрение предлагаемых методов на машиностроительных предприятиях (в частности, при восстановлении валов и осей) даёт экономический эффект за счёт сокращения простоев оборудования и снижения частоты замены деталей.

#### Литература

1. Сулима, А. М. Поверхностное упрочнение деталей машин / А. М. Сулима, В. А. Шулов. – М. : Машиностроение, 2015. – 272 с.
2. Папшев, Д. Д. Упрочнение деталей поверхностным пластическим деформированием / Д. Д. Папшев. – М. : Машиностроение, 2018. – 310 с.
3. Иванов, С. В. Влияние комбинированной лазерно-механической обработки на усталостную прочность сталей / С. В. Иванов, П. А. Кузнецов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2022. – № 8. – С. 12–18.
4. Григорьян, А. Г. Лазерная обработка материалов: современные проблемы и решения / А. Г. Григорьян, А. А. Шиганов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. – 368 с.
5. ГОСТ Р 52749-2019. Расчёты и испытания на усталость. Методы обработки результатов. – М. : Стандартинформ, 2019.

Павлушин А.А.

Научный руководитель: к.т.н., доцент Яшин А.В.

*Муромский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» Россия, 602264, Владимирская область, г. Муром, ул. Орловская, д.23  
pavlushin\_a124@mail.ru*

### **Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя алюминиевых деталей механической обработкой**

**Актуальность:** Алюминиевые сплавы широко применяются в авиастроении, автомобилестроении и приборостроении благодаря высокой удельной прочности и коррозионной стойкости. Однако при механической обработке возникают типичные проблемы: нагартование поверхностного слоя, остаточные растягивающие напряжения, повышенная шероховатость и микродефекты, что снижает усталостную долговечность деталей. Технологическое обеспечение качества требует комплексного подхода: оптимизации режимов резания, выбора геометрии инструмента, применения эффективных СОЖ и методов оперативного контроля. Сочетание современных решений с адаптивным управлением позволяет стабильно достигать заданных параметров поверхностного слоя без снижения производительности.

**Цель:** исследование влияния параметров механической обработки на качество поверхностного слоя алюминиевых деталей и разработка технологических рекомендаций по обеспечению требуемых характеристик.

**Задачи:**

1. Провести анализ основных дефектов поверхностного слоя алюминиевых деталей, возникающих при точении и фрезеровании.
2. Рассмотреть влияние режимов резания, геометрии режущего инструмента и применения СОЖ на шероховатость, микротвёрдость и величину остаточных напряжений.
3. Разработать технологические рекомендации по выбору оптимальных параметров обработки для минимизации дефектов поверхностного слоя.
4. Выполнить проверочные эксперименты по предложенным режимам и сравнить показатели качества с базовым вариантом обработки.

**Результаты:** Исходная шероховатость поверхности при базовых режимах составляла Ra 1,6 мкм. После оптимизации скорости резания до 900 м/мин и подачи до 0,08 мм/об с применением полимерной СОЖ с нанодобавками шероховатость снизилась до Ra 0,6 мкм (улучшение на 62,5%). Контрольные измерения показали снижение остаточных растягивающих напряжений на 20% за счёт устранения эффекта нагартовки. Периодическая правка режущей кромки и контроль вибраций снизили количество микротрещин на 28%. Разработанный технологический процесс обеспечивает стабильное качество поверхности, соответствующее 7–8 качеству точности. Рекомендовано внедрение онлайн-мониторинга акустической эмиссии для оперативной коррекции режимов резания.

**Литературные источники:**

Королев А.В., Мазина А.А., Яковишин А.С., Шалунов А.В. Технологические причины возникновения остаточных напряжений // Современные материалы, техника и технологии. 2016. № 4. С. 12-18. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologicheskie-prichiny-vozniknoveniya-ostatochnyh-napryazheniy> (открытый доступ, индексировано в eLIBRARY.RU)

Ильина А.Д. Методы определения остаточных напряжений в деталях после механической обработки // Форум молодых ученых. 2022. № 3. С. 45-51. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-opredeleniya-ostatochnyh-napryazheniy-v-detalyah-posle-mehanicheskoy-obrabotki> (открытый доступ, индексировано в eLIBRARY.RU)

Приписнов Я.А., Курбаткина Е.И., Косолапов Д.В. Основные тенденции в области механической обработки и получения неразъемных соединений из МКМ на основе алюминиевых сплавов (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 2. С. 60-71. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-tendentsii-v-oblasti-mehanicheskoy-obrabotki-i-polucheniya-nerazemnyh-soedineniy-iz-mkm-na-osnove-alyuminievyh-splavov-obzor> (открытый доступ, индексировано в eLIBRARY.RU)

Семихатский А.Д.

Научный руководитель: к.т.н., доцент Яшин А.В.

*Муромский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»*

*Россия, 602264, Владимирская область, г. Муром, ул. Орловская, д.23*

*ottehcmil@gmail.com*

### **Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин методом лазерного легирования**

Целью этого исследования является изучение актуальности и перспектив лазерного легирования в области обеспечения эксплуатационных свойств деталей.

Задачи:

- Исследовать область применения лазерного легирования.
- Обозначить преимущества и недостатки лазерного легирования.

Современное машиностроение стремится к повышению производительности и качества изделий. Для этого часто проводят исследования для поиска новых методов получения деталей нужного качества.

Лазерное легирование стало активно развиваться в 1970-х годах и в наше время оно активно используется для создания износостойких поверхностей работающих при больших нагрузках.

Лазерное легирование - это метод легирования, при котором лазерный луч расплавляет тонкий слой металла вместе с нанесённым на поверхность легирующим составом. Это создаёт модифицированный слой с повышенными эксплуатационными свойствами.

Физическая сущность процесса заключается в том, что при нагреве поверхностного слоя заготовки лазером происходит конвективное движение металла в ванне расплава, что приводит к насыщению поверхности сталей легирующими элементами, частичная гомогенизация в зоне жидкого металла. [3]

Лазерное легирование позволяет улучшить такие эксплуатационные свойства, как:

- твёрдость
  - износостойкость
  - жаропрочность
  - коррозионную стойкость
- и другие.

Свойства, которые получает заготовка в процессе лазерного легирования зависят от вводимого легирующего элемента: кобальт способствует повышению жаропрочности, алюминий повышает стойкость против коррозионного разрушения, и т. д.

Лазерное легирование имеет следующие преимущества:

- возможность одновременного введения в поверхностный слой ряда легирующих элементов
- высокая скорость процесса
- меньшие ограничения по геометрии, чем у традиционных методов [1]
- экономия легирующего материала

Лазерное легирование применимо к широкому спектру металлов и сплавов, однако оно особо эффективно для углеродистых и низколегированных сталей, поскольку оно позволяет заменять дорогие сплавы на более дешёвые.

Лазерное легирование применяется в областях, где требуются детали с высокими требованиями к надёжности при высоких нагрузках: машиностроении, автомобилестроении, авиастроении и других областях.

Основными недостатками лазерного легирования являются:

- высокая стоимость оборудования
- ограниченная глубина обработки
- высокие температуры могут привести к выгоранию и окислению легирующих элементов.
- отсутствие выдержки при температурах нагрева вместе с высокими скоростями охлаждения может привести к порам и трещинам. [3]

В результате лазерного легирования получается деталь с повышенными эксплуатационными свойствами, а их производство происходит быстро для единичных ответственных деталей и с экономией легирующих элементов.

Подводя итоги, можно сказать, что лазерное легирование является эффективным методом легирования металлов с целью получения повышенных эксплуатационных свойств, когда требуется скорость и экономия материалов, однако подготовка процесса требует значительных затрат и опытных специалистов.

### Литература

1. Шлякова, Е. В. Исследование влияния лазерной термообработки и лазерного легирования на микротвердость жаропрочных сталей и сплавов / Е. В. Шлякова, А. А. Соловьев, Н. А. Толмачева // Национальные приоритеты России. – 2014. – № 2(12). – С. 226-233. – EDN WСJHAJ.
2. Технологические особенности лазерного легирования сталей / Г. Н. Гаврилов, Т. А. Горшкова, Д. Ю. Ермаков [и др.] // Междисциплинарные подходы в материаловедении и технологии. Теория и практика : Сборник трудов Всероссийского совещания заведующих кафедрами материаловедения и технологии материалов, Белгород, 06–08 октября 2015 года / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2015. – С. 66-71. – EDN UZUFOF.
3. Белова, С. А. Формирование структуры поверхностных слоев сталей при лазерном легировании / С. А. Белова, М. С. Калашникова, В. С. Постников // Вестник Пермского государственного технического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2010. – Т. 12, № 2. – С. 93-105. – EDN KVZEXO.
4. Бирюков, В. Лазерное упрочнение и легирование сталей / В. Бирюков // Фотоника. – 2011. – № 3(27). – С. 34-37. – EDN OJGLDL.