

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
НАН БЕЛАРУСИ**

**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ  
СОЗДАНИЯ И ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

**Сборник научных трудов  
В 3 книгах  
Книга 2**

**Технологии и оборудование механической  
и физико-технической обработки**

Минск  
ФТИ НАН Беларуси  
2015

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Н.Ф. Алешин, Г.П. Горецкий</i> Исследование причин выхода из строя цилиндра компрессора для получения жидких газов на ОАО «Крион» .....	7
<i>А.В. Алифанов, А.К. Кулешов, А.С. Демьянчик, Е.А. Веремейко</i> Разработка режимов, исследование и сравнительный анализ комбинированных высокоэнергетических воздействий на стальные образцы с целью повышения их износостойкости .....	13
<i>А.В. Алифанов, Г.П. Горецкий, А.А. Лях, О.А. Толкачева, В.Н. Шишмолин</i> Исследование влияния магнитно-импульсного воздействия на структуру полых стальных изделий с поверхностью сложного профиля .....	19
<i>А.Г. Анисович, И.Н. Румянцева, И.И. Таран</i> О правомерности использования высокоэнергетических воздействий для металлографического травления .....	27
<i>А.Г. Артёмчик, А.В. Сосновский, А.А. Колесникова, Н.А. Мясникова</i> Триботехнические свойства покрытий на основе псевдосплава «сталь–бронза», модифицированного ионами азота .....	33
<i>В.Е. Бабич, Ю.И. Козел, В.К. Корнеева, В.Я. Лебедев, Э.Н. Федорович</i> Уменьшение энергоёмкости процесса магнитно-абразивной обработки ферромагнитных деталей .....	39
<i>А.А. Бакиновский, А.Д. Губко</i> Электронно-лучевая сварка нержавеющей высокобористых сталей ..	44
<i>И.А. Барабанова, Г.В. Раткевич, Л.Е. Афанасьева</i> Микроструктура сплава титана Ti-6Al-4V, полученного по технологии послойного электронно-лучевого синтеза .....	51
<i>Н.Н. Черенда, А.П. Ласковнев, А.В. Басалай, В.И. Шиманский, В.В. Узлов, В.М. Асташицкий, А.М. Кузьмицкий, А.Ю. Изобелло</i> Модификация структуры и трибологических свойств сплава Ti-6Al-4V при высокоэнергетическом плазменном воздействии .....	54
<i>А.А. Гришкевич, А.В. Белый, А.А. Колесникова, В.Н. Гаранин</i> Ионно-лучевое азотирование и стойкость инструмента для деревообработки, изготовленного из быстрорежущей стали ..	60
<i>М.Г. Киселев, А.В. Дроздов, В.Л. Габеев, П.С. Богдан</i> Экспериментальная оценка эффективности применения электроконтактной обработки рабочей поверхности штрипс и дисков с целью придания ей режущей способности .....	65
<i>С.В. Бордусов, С.И. Мадвейко</i> Исследование динамики процесса СВЧ плазменного удаления фоторезистивных защитных пленок в технологии интегральных микросхем .....	71
<i>В.В. Былицкий, В.В. Рудый, М.Н. Босяков, И.Л. Поболь</i> Управляемое ионное азотирование шестерен большого диаметра на промышленном оборудовании .....	76
<i>Т.М. Васильева, С.А. Лопатин, В.П. Варламов, А.А. Сигарев</i> Пучково-плазменные технологии получения низкомолекулярных водорастворимых продуктов из хитина и хитозана .....	83
<i>А.Т. Волочко</i> Высокотеплопроводные керамические материалы для электрических нагревателей ..	85
<i>И.И. Вегера, Э.В. Гайлевич, А.В. Польшаев, М.А. Селедцов</i> Современная система управления процессом индукционного нагрева .....	96
<i>П.С. Гурченко, А.И. Галимский, И.А. Булойчик, А.И. Ковшик</i> Исследование влияния цинковых интерметаллидных диффузионных слоев на изменение ударной вязкости стали 65Г ..	102
<i>С.Д. Латушкина, А.Г. Жиждченко, И.М. Романов, В.Ю. Гладкий, О.И. Терещук, В.М. Комаровская</i> Фазовый состав и физико-механические свойства многокомпонентных (Ti, Zr) <sub>n</sub> покрытий, осажденных из потоков сепарированной вакуумно-дуговой плазмы .....	106
<i>А.Н. Григорчик, Н.А. Мясникова, М.А. Белоцерковский</i> Структурно-фазовое состояние и дюрометрические характеристики газотермических покрытий из сталей разных классов после различных видов химико-термической обработки .....	110
<i>В.И. Гуринович, В.С. Голубев, И.А. Романчук, Ю.А. Колупаев, В.О. Замятин</i> Структурообразование в поверхностных слоях при электродуговой наплавке на детали сельхозтехники .....	117
<i>О.Г. Девойно, М.А. Кардаполова, Н.И. Луцко, А.С. Лапковский</i> Возможности формирования композиционных покрытий армированием газотермических покрытий лазерной наплавкой .....	123

## РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ, ИССЛЕДОВАНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОМБИНИРОВАННЫХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СТАЛЬНЫЕ ОБРАЗЦЫ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ

<sup>1</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси,

<sup>2</sup>Учреждение образования «Белорусский государственный университет»,  
г. Минск, Беларусь

<sup>3</sup>Учреждение образования «Барановичский государственный университет»,  
г. Барановичи, Беларусь

*Исследовано влияние режимов вакуумного нанесения упрочняющих (TiN, ZrN) и антифрикционных (содержащих Cu, S, N) покрытий на стальные образцы с последующей магнитно-импульсной обработкой на трибологические свойства сформированных покрытий, разработаны опытные режимы нанесения покрытий, обеспечивающие повышенные трибологические характеристики стальных образцов. В результате проведенных производственных испытаний установлено, что стойкость дереворежущих ножей, изготовленных из стали У8А и упрочненных разработанным комбинированным методом (вакуумное напыление + магнитно-импульсная обработка), в 1,5 раза превышает стойкость неупрочненных ножей из дорогостоящей высоколегированной стали 6ХВ2С.*

*The effect of modes of vacuum deposition of hardening (TiN, ZrN) and antifriction (Cu, S, N containing) coatings on steel samples, followed by magnetic-pulse treatment on the tribological properties of formed coatings was studied, experienced modes of coating applying were developed, providing for higher tribological characteristics of steel samples. As a result of production tests it was found that, the durability of wood-cutting blades made of steel У8А and hardened by the combined method (vacuum deposition + magnetic-pulse treatment) is 1.5 times higher than the resistance of soft knives of expensive high-alloy steel 6ХВ2С.*

### Введение

Одной из основных проблем машиностроения промышленно развитых стран является проблема повышения качества машин, узлов и деталей. Качество детали в значительной степени определяется свойствами поверхностного слоя материала, из которого она изготовлена. Это связано с тем, что при любых видах нагружения (кручение, изгиб и др.) наибольшее напряжение испытывают поверхностные слои материала деталей машин, а внутренние практически не

испытывают нагрузок. Поверхностные слои также противостоят износу, коррозии, тепловому и другому видам воздействий при эксплуатации [1].

Для упрочнения поверхностных слоев деталей машин применяются многие методы: химико-термическая, лазерная, электронно-лучевая, ионно-плазменная обработки, поверхностная закалка, ионная имплантация; высокоэнергетические методы нанесения упрочняющих и защитных покрытий и др.

В Физико-техническом институте НАН Беларуси и Барановичском государственном университете выявлен и исследован эффект упрочнения сильным электромагнитным полем стальных изделий, в т. ч. закаленных, что открывает широкие перспективы в области упрочняющих технологий. Этот метод выгодно отличается от многих традиционных методов упрочнения простотой исполнения, низкими трудозатратами, малой энергоемкостью, экологической чистотой [2–4].

Необходимость обрабатывать механическими методами высокопрочные поверхности ставят перед инструментальщиками задачу упрочнять режущие инструменты с целью повышения их стойкостных показателей. Применение магнитно-импульсной упрочняющей обработки (МИО) позволяет значительно увеличить период стойкости дереворежущих ножей [2, 3].

В последнее время для модификации инструмента активно создаются методом конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ) и исследуются ионно-плазменные покрытия на базе нитридов тугоплавких металлов (Ti, Mo, Cr, Zr), которые позволяют существенно увеличить физико-механические свойства различных материалов и, соответственно, улучшить эксплуатационные свойства изделий, применяемых в различных отраслях промышленности, в т. ч. при деревообработке [5–6].

Однако, требования производителей к эксплуатационным характеристикам изделий непрерывно растут, в связи с чем появилась необходимость создания комбинированных методов упрочнения, сочетающих различные виды высокоэнергетических воздействий, в частности КИБ и МИО.

Особенности воздействия комбинированного метода вакуумного ионно-плазменного напыления и магнитно-импульсной обработки на микроструктуру, фазовый состав и триботехнические свойства лезвий ножей фрезерного инструмента, применяемого при обработке древесины, практически не изучены. Для проведения исследований были использованы стальные образцы из стали 45. Для уменьшения коэффициента трения поверх упрочняющих покрытий в данной работе химико-термическим методом наносилось медь, а также на поверхность стальных образцов методом сульфатирования наносилось покрытие, содержащее серу и азот.

Сульфатирование [7] – это диффузионный процесс насыщения поверхности деталей серой и азотом. Слой, содержащий соединения серы, ускоряет приработку трущихся пар, улучшает адсорбцию масла и предотвращает схватывание и задиры. Слой карбонитридных фаз и нитридов обеспечивает длительное сохранение высокой износостойкости и хорошую приработку поверхности. Процесс сульфатирования не требует специального оборудования и может быть осуществлен в обычных тигельных печах-ваннах.

Для определения эффективности разработанного метода упрочняющей обработки комбинированным высокоэнергетическим воздействием (вакуумное покрытие + МИО) проведены производственные испытания дереворежущих ножей, изготовленных из стали У8А и упрочненных вышеуказанным методом.

### **Исследование трибологических свойств стальных образцов, упрочненных вакуумными покрытиями и магнитно-импульсной обработкой**

Для проведения исследований было изготовлено 36 стальных образцов из стали 45 размером 10×10×5 мм, произведена шлифовка всех поверхностей. Затем на поверхность 12-ти образцов было нанесено покрытие TiN толщиной 4 мкм, после чего эти образцы были подвергнуты

магнитно-импульсной обработке с энергией импульса 1; 4 и 6 кДж (по 3 образца на каждую величину энергии). На поверхность 12-ти образцов нанесли покрытие ZrN также толщиной 4 мкм, после чего их подвергли магнитно-импульсной обработке по вышеуказанной схеме. На оставшиеся 12 образцов нанесли, кроме TiN и ZrN, слой меди толщиной 4 мкм, после чего образцы также были обработаны магнитно-импульсным воздействием с энергией импульса 1 и 6 кДж (2 образца, покрытых ZrN + Cu, и 2 образца, покрытых TiN + Cu, магнитно-импульсной обработке не подвергались).

На машине трения были исследованы трибологические свойства образцов из стали 45, покрытых нитридом циркония (ZrN) и обработанных магнитно-импульсным воздействием с энергией импульса 1; 4 и 6 кДж.

Микротвердость покрытий на всех образцах находилась в пределах 29–34 ГПа (нагрузка 0,1 Н). Коэффициент трения образцов практически не менялся за время эксперимента и находился в пределах от 0,08 до 0,13. Изменение энергии импульса существенно не повлияло на величину и характер изменений коэффициента трения.

На машине трения также были исследованы трибологические свойства 12-ти образцов из стали 45, покрытых вакуумным упрочняющим покрытием TiN и обработанных магнитно-импульсным воздействием с энергией импульса 1; 4 и 6 кДж. И в этом случае изменение энергии импульса мало влияет на характер изменения коэффициента трения, который находится в пределах 0,09–0,12.

Микротвердость покрытия на всех образцах находилась в пределах 22–34 ГПа, в частности, микротвердость незакаленных образцов из стали 45, упрочненных вакуумными покрытиями TiN и ZrN и магнитно-импульсным воздействием увеличилась: для образцов с покрытием TiN – от 22–25 ГПа до 25–28 ГПа; образцов с покрытием ZrN – от 26–30 ГПа до 29–34 ГПа.

Были проведены исследования трибологических свойств образцов, из стали 45 с комбинированным покрытием ZrN + Cu. Установлено, что коэффициент трения образца, обработанного магнитно-импульсным воздействием, сохраняется практически без изменений в процессе исследования (в пределах 0,05–0,06), а у образца, не обработанного магнитно-импульсным воздействием, коэффициент трения очень быстро увеличивается (от 0,05 до 0,13), ухудшая трибологические свойства покрытия. Такая же картина наблюдается и при исследовании образцов с покрытием TiN + Cu.

Сравнение полученных результатов показывает, что коэффициент трения стальных образцов, покрытых ZrN + Cu и обработанных магнитно-импульсным воздействием, в 1,5–2,0 раза меньше, чем у стальных образцов, покрытых только ZrN или TiN и обработанных магнитно-импульсным воздействием, что позволяет сделать вывод о благоприятном влиянии дополнительной обработки упрочняемых стальных поверхностей медью. Следует также отметить, что медное покрытие, не обработанное импульсным магнитным полем, очень быстро истирается и коэффициент трения соответственно возрастает. Дополнительная обработка магнитно-импульсным воздействием уплотняет медное покрытие и улучшает его адгезию к стальной основе, в результате чего улучшаются его эксплуатационные характеристики (коэффициент трения и износостойкость).

Анализ вышеприведенных исследований трибологических свойств образцов, обработанных комбинированным методом, показывает, что коэффициент трения у образцов с покрытиями TiN и ZrN находится в интервале 0,8–1,3, а у образцов, дополнительно покрытых слоем меди толщиной 4 мкм и упрочненных МИО, коэффициент трения уменьшается до значений 0,05–0,06. Этот результат показывает, что для деталей, работающих в условиях интенсивного износа, целесообразно применять вакуумные покрытия типа TiN и ZrN с последующим нанесением слоя меди и магнитно-импульсной обработкой.

Проведены испытания дереворежущих ножей, изготовленных из относительно дешевой углеродистой стали У8А и упрочненных комбинированным высокоэнергетическим воздей-

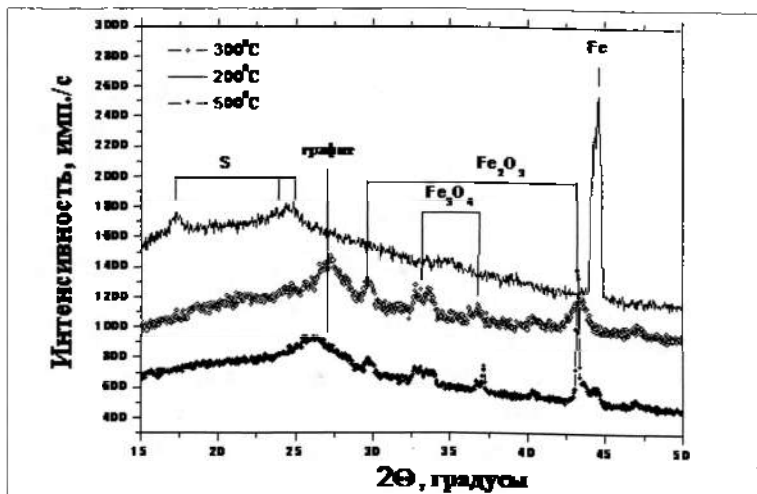


Рис. 1. Рентгенограммы образцов стали после ХТО в зависимости от температуры воздействия

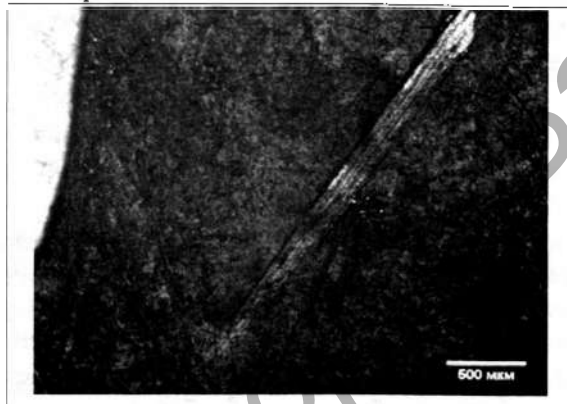


Рис. 2. Оптическая фотография царапины после адгезионных испытаний на образце стали с покрытием в тиомочевине, сформированным на поверхности путем ХТО

ствием (вакуумное покрытие  $ZrN + \text{МИО}$ ). Испытания проводились на производстве мебельной фабрики «Пинскдрев-Адриана» на операции получения технологической древесной щепы. Для сравнения были проведены испытания таких же ножей, изготовленных из дорогостоящей высоколегированной стали 6ХВ2С. Испытания показали, что стойкость ножей из стали У8А, упрочненных разработанным комбинированным методом, в 1,5 раза превысила стойкость неупрочненных ножей из стали 6ХВ2С. Учитывая, что сталь У8А дешевле стали 6ХВ2С, применение этой стали позволит сэкономить предприятию значительные средства, в том числе валютные.

### Формирование покрытий на поверхности образцов из стали 45 путем их химико-термической обработки в среде тиомочевины

Исследовано влияние химико-термической обработки (ХТО) образцов из стали 45 состоящей в их погружении в порошок тиомочевины ( $\text{NH}_2\text{-CS-NHC}$ ) и последующего нагрева в течении 6 часов при температурах 200, 300, 500 °С, на фазовый состав, фрикционные и адгезионные свойства модифицированных поверхностных слоев.

При всех температурах обработки на поверхности стали формируется покрытие, толщина которого растет с увеличением температуры обработки. Состав покрытия с ростом температуры, как следует из данных рентгеноструктурного анализа, представленного на рис. 1, меняется от смеси серы и аморфного графита до смеси аморфного и кристаллического графита и оксидов железа. При температуре обработки 200 °С пленка на поверхности стали имеет значительную адгезию к стали, (отрыв пленки происходит при силе нагружения на индентор 8–9 Н при ее царапании) (рис. 2).

Результаты измерения коэффициента трения образцов стали после ХТО в тиомочевине ( $\text{NH}_2\text{-CS-NHC}$ ) и последующего нагрева в течении 6 часов в закрытом фарфоровом сосуде при температурах 200, 300, 500 °С, показывают, что с ростом температуры нагрева коэффициент трения значительно уменьшается (рис. 3).

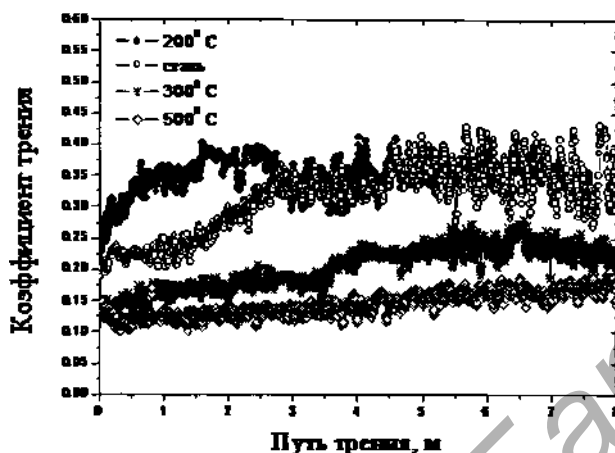


Рис. 3. Коэффициент трения образцов стали в зависимости от температуры ХТО в тиомочевине

Снижение коэффициента трения является результатом формирования углеродных слоев в виде аморфного и кристаллического графита при разложении тиомочевины, имеющих, как известно, низкий коэффициент трения.

### Заключение

Анализ вышеприведенных исследований трибологических свойств образцов, обработанных комбинированным методом, показывает, что коэффициент трения у образцов с покрытиями TiN и ZrN находится в пределах 0,8–1,3, а у образцов, дополнительно покрытых слоем меди толщиной 4 мкм, коэффициент трения уменьшается до значений 0,5–0,75. Этот результат показывает, что для деталей, работающих в условиях интенсивного износа, целесообразно применять вакуумные покрытия типа TiN и ZrN с последующим нанесением слоя меди и магнитно-импульсной обработкой. Дополнительная обработка магнитно-импульсным воздействием уплотняет медное покрытие и улучшает его адгезию к стальной основе, в результате чего улучшаются его эксплуатационные характеристики (коэффициент трения и износостойкость).

Установлено, что химико-термическая обработка образцов из стали 45 в тиомочевине при температурах 200, 300, 500 °С в течении 6 часов позволяет создать на поверхности стали покрытие толщиной в 10–12 микрометров, состоящее из аморфной фазы на основе углерода, серы с включениями мелкодисперсного кристаллического графита. Покрытие, сформированное при 200 °С, имеет максимальную адгезионную силу отрыва от стали в 8–9 Н, а коэффициент трения покрытия, полученного при 500 °С, обладает минимальным значением из всех сформированных покрытий: 0,1–0,15.

В результате проведенных производственных испытаний установлено, что стойкость дереворежущих ножей, изготовленных из относительно дешевой стали У8А и упрочненным разработанным комбинированным методом (вакуумное напыление + МИО), в 1,5 раза превышает стойкость неупрочненных ножей из дорогостоящей высоколегированной стали 6ХВ2С.

### Список использованных источников

1. Жарский, И.М. Технологические методы обеспечения надёжности деталей машин / И.М. Жарский, И.Л. Баршай, Н.А. Свидунович, Н.В. Стридонов // Минск: Выгйзйшая школа. – 2005. – 299 с.
2. Алифанов, А.В. 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. – с. 77–83.

3. Алифанов А.В. Влияние режимов упрочняющей магнитно-импульсной обработки на прочностные характеристики дереворежущих ножей / А.В. Алифанов, Ж.А. Попова, А.С. Демянчик. – *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. «Промышленность. Прикладные науки»*. – 2012. – С. 74–78.

4. 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.

5. Алифанов А.В. [и др.] Влияние TiN покрытий твердосплавных ножей на эксплуатацию дереворежущего фрезерного инструмента при обработке ламинированных ДСтП // *Труды БГТУ*. – 2012. – №2: *Лесная и деревообработ. пром-сть*. – С. 207-211.

6. Гришкевич А.А. [и др.] Особенности износа упрочненных методом КИБ лезвий ножей дереворежущего фрезерного инструмента при обработке ДСтП // *Сб. материалов VII Междунар. науч.-техн. конф. «Современные методы и технологии создания и обработки материалов» 19-21 сентября 2012 г., Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2012. – Кн. 2. – С. 297–303.*

7. Елизаветин, М.А. Технологические способы повышения долговечности машин / М.А. Елизаветин, Э.А. Сатель // *М. : Машиностроение*. – 1969. – 400 с.

Статья поступила в редакцию 02.04.2015