



УДК 621.784.4

Поступила 28.03.2014

А. В. АЛИФАНОВ, А. С. ДЕМЯНЧИК, УО «Барановичский государственный университет, А. А. ЛЯХ,  
А. М. МИЛЮКОВА, ФТИ НАН Беларуси

## ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДЕРЕВОРЕЖУЩИХ НОЖЕЙ КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ НАНЕСЕНИЯ ВАКУУМНЫХ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ И МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

*Изучено влияние режимов вакуумного напыления упрочняющих покрытий (в частности, нитрида титана) на стальные образцы и магнитно-импульсной обработки этих покрытий на прочность адгезионных связей нанесенного покрытия с подложкой (стальным образцом). Рекомендованы режимы обработки, обеспечивающие наиболее прочную адгезию. Представлены результаты опытно-промышленных испытаний дереворежущих ножей, упрочненных комбинированным методом нанесения вакуумных упрочняющих покрытий и магнитно-импульсной обработки.*

*Influence of modes of vacuum spatter of strengthening coverings (in particular titanium nitride) on steel samples and magnetic-pulse processing of these coverings on durability of adhesive bindings of the applied covering with bottom layer (steel sample) is studied. Results of experimental-industrial tests of the woodcutting knives strengthened by the combined method of applying of vacuum strengthening coverings and magnetic-pulse processing are presented.*

### Введение

Для увеличения или сохранения конкурентоспособности своих изделий на международном и внутреннем рынках современное промышленное производство остро нуждается в новых прогрессивных технологиях, позволяющих получать изделия высокого качества и при этом снижать материало- и энергоемкость, трудоемкость, обеспечивать экологическую чистоту и т. д. В настоящее время большое внимание уделяется вопросам повышения прочностных и трибологических свойств деталей машиностроения, станкоинструментальной промышленности и др., в частности, работающих в условиях ударных нагрузок и интенсивного изнашивания. К таким деталям можно отнести рубильные ножи для производства технологической и топливной щепы, ножи для рубки заготовок из стального проката, дереворежущий инструмент, многие изделия машиностроения и т. д.

В Физико-техническом институте НАН Беларуси выявлен и исследован эффект упрочнения сильным электромагнитным полем стальных изделий, в том числе закаленных, что открывает широкие перспективы в области упрочняющих технологий. Этот метод выгодно отличается от многих традиционных методов упрочнения простотой ис-

полнения, низкими трудозатратами, малой энергоемкостью, экологической чистотой [1–3].

В то же время требования производителей к эксплуатационным характеристикам изделий непрерывно растут, в связи с чем появилась необходимость создания комбинированных методов упрочнения, сочетающих различные виды высокоэнергетических и механических воздействий, например, магнитно-импульсная обработка (МИО) и химико-термическая обработка (ХТО); ХТО и МИО; МИО и ионное азотирование; ионное азотирование и МИО; пластическое деформирование и МИО и др.

Воздействие МИО на стали и сплавы в чем-то идентично процессу высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) – активизируются аустенитно-мартенситные превращения, диффузионные процессы примесных элементов, образование и дробление карбидов и т. д. Только в отличие от ВТМО магнитно-импульсную обработку осуществить гораздо проще и экономичней. Конечно, имеются и существенные отличия, которые планируется изучить в дальнейших исследованиях.

В последнее время для модификации инструмента активно создаются методом КИБ и исследуются ионно-плазменные покрытия на базе нитри-

дов 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 том числе при деревообработке [4, 5].

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.

#### Вакуумные покрытия и их адгезионные взаимодействия с подложкой

Прочность сцепления покрытия с подложкой определяется адгезией – это комплексная характеристика, которая зависит от типа связей между покрытием и подложкой, от внутренних напряжений в покрытии, которые подразделяются на термические и структурные, и от степени предварительной очистки поверхности от загрязнений. В основе адгезионных связей покрытия с поверхностью подложки лежат два фактора, которые определяют прочность связи: механическое и молекулярное взаимодействия. Адгезия является главной характеристикой любого покрытия.

Нанесение вакуумных покрытий производили на установке ВУ-1Б, а их обработку магнитно-импульсным воздействием – на магнитно-импульсной установке (МИУ), разработанной и изготовленной в лаборатории механофизики формирования гетерогенных систем ФТИ НАН Беларуси.

Для проведения исследований использовали закаленные образцы из стали Р6М5, площадь их поверхности для напыления составляла  $10^{-4}$  м<sup>2</sup>. Следует отметить, что образцы для исследований должны соответствовать следующим условиям: быть чистыми, не иметь заусенец, ржавчины, прижогов, следов побежалости и трещин, шероховатость поверхности образцов должна быть не ниже Ra 0,2.

Для нанесения покрытий на стальную подложку был использован метод конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ). Метод КИБ характеризуется тем, что обеспечивает хорошую адгезию покрытия к подложке, имеет высокую производительность, универсальность по напыляемым материалам, равномерность по толщине покрытия и др. Одним из главных недостатков метода КИБ является наличие капельной фазы, но при оптимальных режимах нанесения ее наличие сводится к мини-

муму и не оказывает заметного влияния на работоспособность покрытия. В данной работе после нанесения покрытий производили их обработку на МИУ в диапазоне энергий 0,5–6,0 кДж. Затем проводили исследования адгезионных характеристик покрытий.

#### Исследование прочности адгезионных связей вакуумных покрытий с подложкой

Одним из наиболее надежных способов определения адгезии покрытия к подложке является метод царапания, который заключается в нанесении иглой на поверхность износостойкого покрытия риски с возрастающей нагрузкой до тех пор, пока напыленный слой не отделится от подложки [6]. Исследования адгезии полученных покрытий к подложке проводили методом царапания на специальном устройстве. В качестве иглы была использована эльборовая пирамида с углом заточки 136° и радиусом острия 0,02 мм; нагрузки составляли от 10 до 700 г.

На поверхность закаленных до 60 ед. HRC образцов из стали Р6М5 наносили покрытие из TiN при различном давлении рабочего газа (азота). Толщина покрытия составляла порядка 3 мкм. При исследовании влияния давления рабочего газа на твердость покрытий TiN (диапазон давлений  $1,5 \cdot 10^{-2}$  –  $6 \cdot 10^{-1}$  Па) установлено, что при уменьшении давления рабочего газа наблюдается рост твердости системы «покрытие-подложка». В частности, установлено, что микротвердость указанных выше образцов из стали Р6М5 изменяется от 12 до 7 ГПа, уменьшаясь с ростом давления азота. Исходя из данных результатов, для проведения работ по исследованию влияния магнитно-импульсного воздействия на адгезионные свойства вакуумных упрочняющих покрытий к стальной подложке были нанесены покрытия TiN толщиной порядка 3 мкм при величинах давления рабочего газа  $3 \cdot 10^{-2}$  и  $3 \cdot 10^{-1}$  Па и затем произведена их обработка импульсным магнитным полем (рис. 1).

На рисунке показан боковой шлиф образца с покрытием TiN после обработки импульсным магнитным полем с энергией 0,5 кДж на установке МИУ. Из рисунка видно, что покрытие получается качественное, равномерное по толщине с хорошей адгезией. Чтобы обеспечить высокую износостойкость, покрытия должны иметь более высокую твердость, но высокая твердость предполагает большую хрупкость и большие внутренние напряжения в покрытии. Образец с покрытием толщиной порядка 3 мкм, обработанным импульсным магнитным полем с энергией импульса 6 кДж, после проведения исследования адгезии методом ца-

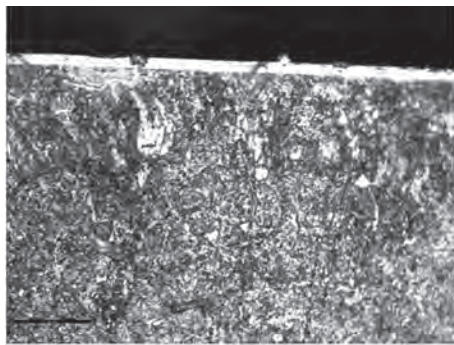


Рис. 1. Структура поверхности стального образца из стали Р6М5 с нанесенным вакуумным покрытием TiN, обработанным импульсным магнитным полем.  $\times 1000$



Рис. 2. След от иглы на поверхности стального образца с нанесенным покрытием, обработанным магнитно-импульсным воздействием, после исследования прочности сцепления покрытия с подложкой.  $\times 300$

рапания при нагрузке 300 г на иглу представлен на рис. 2. Давление рабочего газа (азота) в процессе вакуумного напыления составляло  $3 \cdot 10^{-2}$  Па.

Из рисунка видно, что при царапании небольшие участки покрытия имеют адгезионный отрыв от поверхности. Это указывает на высокую хрупкость покрытия и возможные микротрещины в нем. Чтобы уменьшить внутренние напряжения в покрытии, было произведено напыление покрытия TiN толщиной порядка 3 мкм при давлении рабочего газа (азота)  $3 \cdot 10^{-1}$  Па. Затем была осуществлена их обработка импульсным магнитным полем с энергией 6,0 кДж, после чего были проведены исследования адгезионной прочности покрытия (рис. 3).

Из рисунка видно, что адгезия покрытия к подложке улучшилась, однако имеются места с разрушениями (отслоением) покрытия. Для улучшения адгезии было решено наносить на стальную подложку промежуточный слой из чистого титана, на который наносили и упрочняющее покрытие TiN. На поверхность образца наносили слой из чистого титана толщиной порядка 3 мкм, на который затем наносили слой TiN такой же толщины и обрабатывали импульсным магнитным полем с энергией

импульса 6,0 кДж. Затем проводили исследование адгезии (рис. 4).

Установлено, что разрушения покрытия начинают появляться при нагрузке 200 г, а при нагрузке 300 г наблюдается непрерывный след разрушения, причем разрушение носит когезионный характер. Это говорит о том, что прочность сцепления покрытия титана с подложкой превышает прочность титана. Основываясь на полученных результатах, были внесены изменения в технологию напыления покрытий из TiN. На подложку из стали Р6М5 первоначально наносили слой титана толщиной 0,3 мкм, затем проводили ионную бомбардировку поверхности, после чего наносили основное покрытие из TiN толщиной не менее 3 мкм. Проводили измерения твердости и микротвердости, после чего осуществляли обработку импульсным магнитным полем на МИУ. Результаты исследования адгезионных характеристик представлены на рис. 5.

Таким образом, в результате проведенных исследований влияния магнитно-импульсного воздействия на адгезионные свойства вакуумных упрочняющих покрытий к стальной подложке установлено:

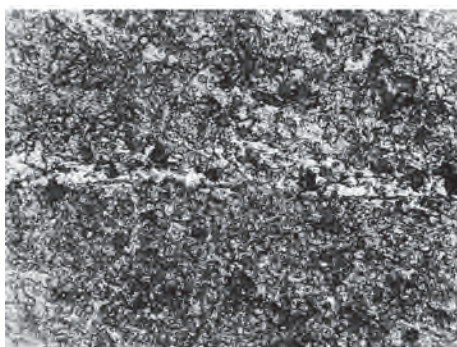


Рис. 3. Характер разрушения иглой покрытия TiN, полученного при давлении рабочего газа (азота)  $3 \cdot 10^{-1}$  Па с последующей магнитно-импульсной обработкой с энергией импульса 6,0 кДж.  $\times 300$



Рис. 4. Характер следа от царапания иглой поверхности стального образца, покрытого подслоем титана толщиной 3 мкм и слоем TiN толщиной 3 мкм, обработанным импульсным магнитным полем.  $\times 300$

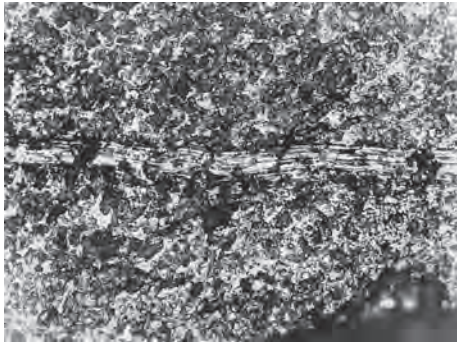


Рис. 5. Вид поверхности образца с нанесенными слоями Ti толщиной 0,3 мкм и TiN толщиной 3 мкм, обработанной импульсным магнитным полем с энергией импульса 6,0 кДж, после испытаний адгезионной прочности покрытия методом царапания.  $\times 300$

- при нанесении вакуумных покрытий необходимо выдерживать давление рабочего газа (азота) в пределах  $(3-6) \cdot 10^{-1}$  Па;
- целесообразно на стальной подложке предварительно формировать переходный слой из чистого титана;
- в качестве подложки следует использовать стали с температурой отпуска не ниже 500 °С;
- магнитно-импульсная обработка с энергией импульса от 0,5 до 6,0 кДж не приводит к разрушению ионно-плазменных покрытий TiN.

**Опытно-промышленные испытания дерево-режущих ножей, упрочненных комбинированным методом нанесения вакуумных покрытий и магнитно-импульсной обработки**

С целью апробации результатов проведенных исследований в производственных условиях были выполнены опытно-промышленные испытания дерево-режущих ножей, упрочненных комбинированным методом, на различных деревообрабатывающих предприятиях Республики Беларусь, в частности, на ОАО «Барановичидрев» и УПП «Мебельная фабрика «Явид».

Комбинированная упрочняющая обработка дерево-режущих ножей производилась путем ионно-плазменного напыления нитрида титана толщиной 4 мкм (на вакуумной установке ВУ-1Б) и магнитно-импульсного воздействия с энергией импульса до 6 кДж на магнитно-импульсной установке (рис. 6).

Дерево-режущие ножи (рис. 7) испытывали на ОАО «Барановичидрев» на операции фрезерования деталей «наличник» и «дверной нащельник» (материал – сосна). Обработку деталей производили на деревообрабатывающем станке мод. Unimat (рис. 8).

За период испытаний опытные ножи показали стойкость, в 5,9 раз превышающую стойкость аналогичных ножей (сталь 65Г), обычно применяемых на предприятии для получения вышеуказанных де-



Рис. 6. Магнитно-импульсная установка для упрочнения стальных изделий

талей (материал – сосна) и не подвергнутых дополнительной упрочняющей обработке (стойкость ножей определялась до их очередной перезаточки).

Следует отметить, что в период проведения опытно-промышленных испытаний применяли древесину с резко отличающейся влажностью (от 5 до 45%) и наличием абразивных элементов (песка), что отрицательно сказывалось на работоспособности дерево-режущего инструмента по сравнению с обработкой чистой и более однородной по влажности древесины. Стойкость же опытных ножей, упрочненных комбинированным методом (нанесение покрытия TiN с последующей магнитно-импульсной обработкой), значительно превысила стойкость серийных ножей (в 5,9 раз), что говорит о высокой эффективности разработанного комбинированного метода упрочняющей обработки.

Также были проведены опытно-промышленные испытания дерево-режущих ножей, применяемых на УПП «Мебельная фабрика «Явид» (твердый сплав ВК8), на операции фрезерования деталей «профиль фасада» и «брус квадратный» (материал –

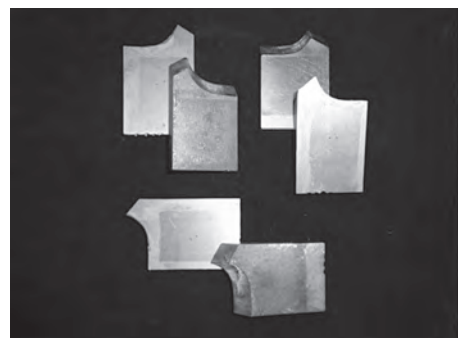


Рис. 7. Дерево-режущие ножи из стали 65Г



Рис. 8. Фрезерный деревообрабатывающий станок Unimat

массив дуба). За период испытаний опытные ножи показали стойкость, в 1,9 раз превышающую стойкость аналогичных ножей (также из твердого сплава ВК8), обычно применяемых на предприятии для получения вышеуказанных деталей и не подвергнутых дополнительной упрочняющей обработке.

Полученные результаты позволяют рекомендовать применение разработанного в ФТИ НАН Беларуси и УО «Барановичский государственный университет» комбинированного высокоэнергетического метода упрочнения (вакуумное напыление + магнитно-импульсная обработка) для упрочняющей обработки фрезерных ножей, изготовленных из стали 65Г и твердого сплава ВК8 и применяемых для обработки деталей из различных древесных материалов.

#### Исследование геометрических параметров дереворежущих ножей

В качестве контролируемых параметров были выбраны радиус округления режущей кромки, линейный износ режущей кромки и количество обработанных метров древесного материала.

На рис. 9 показана фотография острия ножа из стали 65Г. Радиус округления режущей кромки ножа перед началом испытаний составляет  $\approx 10$  мкм.

На рис. 10 показана фотография затупившегося после проведения испытаний ножа, упрочненного комбинированным методом (вакуумное покрытие TiN + МИО). Нож проработал 12 дней. Величина радиуса закругления режущей кромки составила  $\approx 30$  мкм.

На рис. 11 показана фотография режущей кромки ножа из стали 65Г, обычно применяемого на предприятии и не подвергавшегося комбинированному упрочнению. Радиус режущей кромки ножа  $\approx 30$ – $35$  мкм, но период эксплуатации ножа составил всего 2 дня.

За период проведения опытно-промышленных испытаний серийных и упрочненных ножей подсчитывали количество погонных метров обработанной древесины (материал – сосна переменной влажности) до первой перезаточки ножей.

Опытными ножами, упрочненными комбинированным методом, было обработано  $\approx 5200$  пог. м

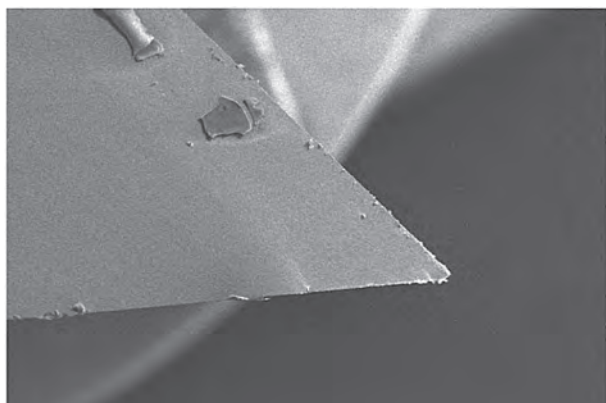


Рис. 9. Серийный нож из стали 65Г до проведения испытаний.  $\times 100$

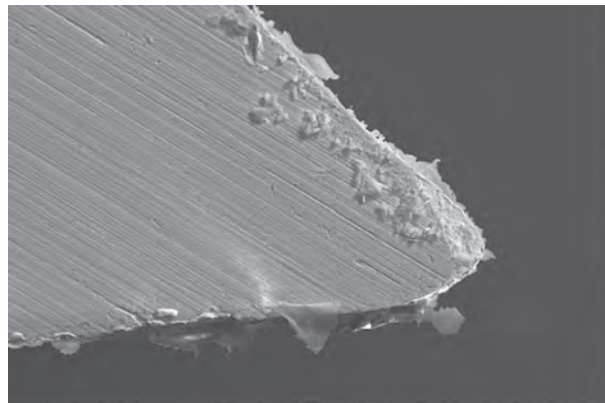


Рис. 10. Опытный нож (сталь 65Г) с покрытием + МИО после 12 дней испытаний.  $\times 100$

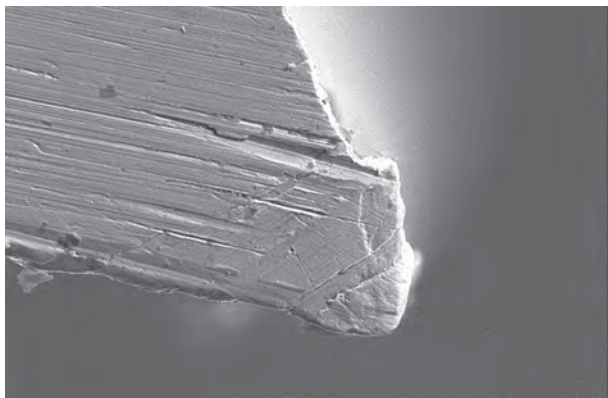


Рис. 11. Серийный нож (сталь 65Г) без упрочняющей обработки после двух дней испытаний.  $\times 100$

древесины, а серийными (без упрочняющей обработки) – около 870 пог. м.

Кроме радиуса режущей кромки ножей после их опытно-промышленных испытаний, проводили измерения линейного износа ножей. Максимальная величина линейного износа режущей кромки серийных ножей из стали 65Г, не подвергавшихся комбинированному упрочнению, после двух дней работы (до выхода их из строя по причине потери необходимой остроты лезвия) составила  $\approx 0,12$  мм, а у ножей из стали 65Г, упрочненных комбинированным воздействием (напыление + МИО) –  $\approx 0,1$  мм после 12 дней работы.

## Выводы

Установлено, что магнитно-импульсная обработка стальных закаленных образцов (сталь 65Г), предварительно упрочненных путем вакуумного нанесения нитрида титана, улучшает адгезию нанесенного покрытия к основе за счет активизации диффузии легирующих элементов в глубь изделия, упрочняет покрытие на 20–30% путем его уплотнения. Таким образом, увеличиваются глубина упрочненного слоя и его твердость, что обеспечивает повышение трибологических и стойкостных характеристик упрочненного таким методом изделия. Теоретические выводы подтверждены экспериментально: испытания дереворежущих ножей из стали 65Г, упрочненных комбинированным методом (вакуумное напыление + МИО), на производстве ОАО «Барановичдрев» при обработке изделий из сосны показали, что их стойкость увеличилась в 5,9 раз по сравнению с такими же, но не упрочненными ножами.

Дереворежущие ножи из твердого сплава ВК8, упрочненного комбинированным методом (МИО + вакуумное напыление), прошли испытания на производстве УПП «Мебельная фабрика «Явид» при обработке изделий из дуба и показали увеличение стойкости в 1,9 раз по сравнению с такими же, но не упрочненными ножами.

## Литература

1. Алифанов А. В., Акулов А. В., Попова Ж. А., Демянчик А. С. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка изделий из конструкционных и инструментальных сталей // *Литье и металлургия*. 2012. № 3. С. 77–83.
2. Алифанов А. В., Попова Ж. А., Демянчик А. С. Влияние режимов упрочняющей магнитно-импульсной обработки на прочностные характеристики дереворежущих ножей // *Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. В. «Промышленность. Прикладные науки»*. 2012. С. 74–78.
3. Алифанов А. В., Попова Ж. А., Ционенко Н. М. Механизм упрочнения легированных сталей в импульсном магнитном поле // *Литье и металлургия*. 2012. № 4. С. 151–155.
4. Алифанов А. В. [и др.] Влияние TiN-покрытий твердосплавных ножей на эксплуатацию дереворежущего фрезерного инструмента при обработке ламинированных ДСтП // *Лесная и деревообработ. пром-сть*. 2012. № 2. С. 207–211.
5. 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.
6. Кострицкий А. Н. [и др.] Справочник оператора установок по нанесению покрытий в вакууме. М.: Машиностроение, 1991.