

УДК 539.422.5

А. В. Белый¹, В. Н. Гаранин², А. А. Гришкевич², А. Ф. Аникеенко²¹Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси²Белорусский государственный технологический университет**ВЛИЯНИЕ ИОННО-ЛУЧЕВОГО АЗОТИРОВАНИЯ
ДЕРЕВОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА, ИЗГОТОВЛЕННОГО
ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ, НА ПЕРИОД ЕГО СТОЙКОСТИ**

Выполнен анализ структурных изменений и триботехнических свойств поверхностных слоев дереворежущего инструмента из быстрорежущей стали типа P18, подвергнутого ионно-лучевому азотированию. Представлены полученные данные проведенных лабораторных испытаний упрочненного дереворежущего инструмента. Показано, что правильный выбор параметров обработки обеспечивает увеличение стойкости инструмента до 2,5 раза.

На основании теоретических исследований установлено, что несмотря на относительно высокую себестоимость, ионно-лучевая обработка позволяет в ряде случаев обеспечивать недостижимый другими методами комплекс физико-механических свойств. Особенно эффективна обработка гетерогенных материалов, в которых границы раздела фаз с сильно различающимися механическими свойствами являются концентраторами напряжений и потенциальными областями возникновения повреждений.

Для исследования использовались ножи для обработки древесины, выполненные из быстрорежущей стали типа P18. Выбор был обоснован тем, что сталь P18 относится к быстрорежущим сталям вольфрамового класса, уникальные свойства которых (высокая теплостойкость, красностойкость при наличии высокой твердости и износостойкости) достигаются посредством специального легирования и сложной термической обработки, обеспечивающих определенный фазовый состав.

Представленные данные показывают, что уменьшение радиуса резания при использовании упрочненной стали происходит в 2,5 раза медленнее, чем при применении той же стали без упрочнения.

Ключевые слова: сталь, азотирование, фреза, испытание, фрезерование, период стойкости.

A. V. Belyy, V. N. Garanin, A. A. Grishkevich, A. F. Anikeenko

The Physical-Engineering Institute of the National Academy of Sciences of Belarus

Belarusian State Technological University

**THE INFLUENCE ION-BEAM NITRIDING OF WOODWORKING TOOLS,
MADE OF HIGH SPEED STEEL, FOR THE PERIOD OF ITS RESISTANCE**

Analysis of the microstructure transformation and tribological properties of wood-cutting tool made from high speed steel P18 treated with nitrogen ions is presented. The received data of laboratory tests of hardened wood-cutting tools are presented. It has been demonstrated that proper selection of processing parameters provides tool durability increase up to 2.5 times.

On the basis of theoretical research have shown that despite the relatively high cost, ion-beam treatment can, in some cases, provides an unattainable by other methods complex physical and mechanical properties. Especially effective treatment of heterogeneous materials in which the phase boundary with very different mechanical properties are stress concentrators and potential areas of damage.

For the research used the blades for wood, made of high speed steel type P18. The choice was based on the fact that the steel P18 refers to the high-speed steel tungsten-class, unique properties (high heat resistance, red hardness in the presence of high hardness and wear resistance) are achieved through a special alloying and complex heat treatment to ensure a certain phase composition.

The presented data show that the reducing of radius of cutting hardened steel occur 2.5 times slower than when using the same steel without hardening.

Key words: steel, nitriding, mill, testing, milling, period resistance.

Введение. К перспективным методам повышения износостойкости инструмента относится ионно-лучевая обработка при высоких плотностях тока, в частности, обработка с использованием примесей внедрения, обеспечивающая большую глубину модифицированного слоя и эффективное упрочнение поверхности [1].

Установлено, что образование на межфазных границах наноразмерных упрочняющих включений приводит к эффективному расширению интерфейсных областей с соответствующим снижением градиентов локальных напряжений и реализацией механизма дисперсного упрочнения границ [2].

Проведенные ранее исследования стали Р6М5 [3, 4] показали, что наиболее эффективное повышение триботехнических характеристик стали наблюдается после ионно-лучевого азотирования при температуре 770 К, энергии бомбардирующих ионов 2–3 кэВ; плотности ионного тока 2 мА/см²; интегральном флюенсе ионов 3·10¹⁹ см⁻². Толщина модифицированного слоя составляет свыше 40 мкм, а микротвердость поверхности достигает 12 000 МПа. В поверхностном слое наблюдается формирование ряда нитридов и карбонитридов, а также аморфных областей, образующихся по механизму твердофазной аморфизации. Обработка при более низких температурах приводит к формированию модифицированного слоя, толщина которого слишком мала для обеспечения высокой несущей способности поверхности. Микротвердость поверхности также оказывается ниже (10 500 МПа). При более высоких температурах происходит увеличение концентрации и укрупнение высокопрочных включений в поверхностном слое стали, вызывающее его охрупчивание и ухудшение триботехнических характеристик.

Основная часть. Выбранная сталь широко применяется при изготовлении ножей и инструмента для строгания, долбления, точения, изготовления сверл, разверток, метчиков, в том числе инструмента для деревообработки. Для сталей с высокой концентрацией вольфрама характерна повышенная карбидная неоднородность, способствующая выкрашиванию инструмента. Исследуемые ножи имели размер 100×30×3 мм.

Химический анализ стали проводился с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра S4 PIONEER.

Металлографический анализ выполнялся с применением микроскопа ЕС МЕТАМ РВ-21, оснащенного приставкой для анализа изображений и программного комплекса обработки изображений (рис. 1).

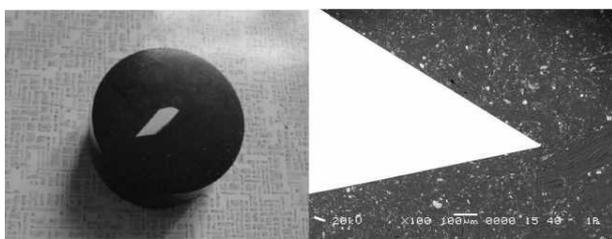


Рис. 1. Исследуемая часть поперечного сечения ножа и его режущая кромка в увеличении

Триботехнические испытания проводились на машине трения СМЦ-2 по схеме диск – частичный вкладыш из изучаемой стали в среде смазочно-охлаждающей жидкости. Величина износа определялась по потере массы вкладыша. Диаметр

диска равнялся 35 мм, максимальная нагрузка – 1000 Н, частота вращения диска – 300 мин⁻¹.

Для испытания инструмента на стойкость при взаимодействии с древесным материалом использовалась установка, созданная на базе станка Unimat 23EL (рис. 2, а), а для контроля изменения радиуса резания инструмента – установка OptiControl (рис. 2, б).



а



б

Рис. 2. Установки:
а – Unimat 23EL; б – OptiControl

Испытания проводились при следующих параметрах обработки: скорость подачи – $V_s = 6$ мин⁻¹; припуск на обработку – $h = 2$ мм; частота вращения инструмента – $n = 6000$ мин⁻¹; число работающих ножей – $z = 1$; диаметр резания – $D = 128$ мм; угол резания – $\delta = 65$ град; угол заострения ножа – $\beta = 40$ град.

Для ионно-лучевой обработки использовалась модернизированная установка УВН-2М, оснащенная ионным источником типа ускорителя с анодным слоем и замкнутым дрейфом электронов, которая находится в ФТИ НАН Беларуси.

Источник генерировал поток ионов азота длиной 120 и шириной 25 мм. При обработке применялась система механического сканирования модифицируемых поверхностей, обеспечивающая равномерное облучение. Имплантация проводилась при энергиях ионов азота 2 кэВ и плотности ионного тока 2 мА/см². Температура образцов в процессе ионно-лучевой обработки в диапазоне 770 К, а время обработки 1,5 ч. Контроль температуры осуществлялся с помощью хромель-алюмелевой термомпары.

Анализ структурно-фазовых изменений происходил с использованием рентгеновского дифрактометра ДРОН 3 по методике, описанной в статье [3].

Данные химического анализа исследуемой стали приведены в табл. 1.

Таблица 1
Химический состав исследуемой стали

Химический элемент	Концентрация, %
Железо	78,6
Вольфрам	16,7
Хром	3,7
Ванадий	1,0

Ионно-лучевая обработка стали при высокой плотности ионного тока и температуре 770 К приводит к формированию модифицированного поверхностного слоя толщиной 40–50 мкм. Верхняя часть этого слоя образована слаботравящимся слоем, под которым находится слой с повышенной травимостью.

Основным карбидом в исследуемой стали является $(Fe,M)_6C$, обладающий сложной ГЦК кристаллической решеткой с пространственной группой $Fd\bar{3}m$.

Насыщение матричных фаз стали атомами азота приводит к выделению большого количества нитридных (γ' и ϵ) и дисперсных карбонитридных $M_6(C,N)$ и $M(C,N)$ фаз, изоморфных соответствующим карбидным фазам.

В табл. 2 продемонстрированы результаты триботехнических испытаний. Приведенные данные показывают, что ионно-лучевое азотирование обеспечивает повышение износостойкости стали примерно в 2,5 раза.

Результаты испытаний инструмента на стойкость при обработке древесного материала МДФ показаны на рис. 3.

Сопоставление данных по структуре поверхностного слоя и изменению радиуса резания показывает, что за использованный период испытания модифицированный слой был изношен не более чем на половину своей толщины.

Изменение коэффициента трения, особенно значительное на ранних стадиях фрикционного взаимодействия, обусловлено снижением адгезионного взаимодействия при образовании на поверхности упоминавшегося нетравящегося слоя, также уменьшением площади фактического контакта за счет упрочнения поверхностного слоя.

Таблица 2

Коэффициент трения и скорость изнашивания стали P18 в функции времени

Обработка поверхности	Время испытаний, мин	Коэффициент трения	Скорость изнашивания стали мкм/мин
Инструмент без упрочнения	0	1,4	–
	20	1,1	0,4
	40	0,4	1,1
Ионно-лучевая обработка	0	1,2	–
	20	0,7	0,2
	40	0,3	0,4

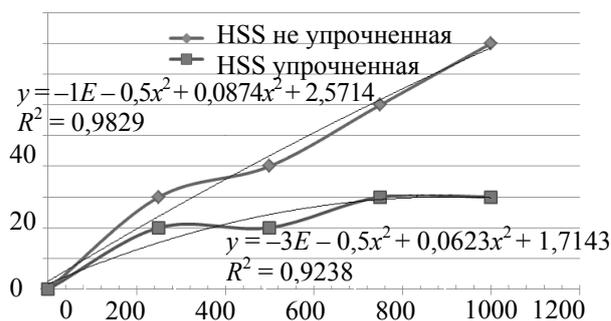


Рис. 3. Зависимости радиуса резания R инструмента от пути трения L

Таким образом, представленные данные показывают, что уменьшение радиуса резания при использовании упрочненной стали происходит в 2,5 раза медленнее, чем при применении той же стали без упрочнения, что указывает на работоспособность упрочненных слоев исследуемой стали P18.

Заключение. Повышение износостойкости можно объяснить упрочняющим действием образующихся при ионно-лучевой обработке нитридов и карбонитридов, равно как генерацией остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое стали P18 при насыщении ее примесями внедрения. Ранее было показано, что удельный размер образующихся при имплантации частиц превышает удельный объем матричной фазы легируемого материала. Следует также отметить, что по данным статьи [5] наблюдавшаяся в поверхностных слоях ионно-азотированных сталей γ' -фаза обладает наилучшими триботехническими характеристиками в сравнении с другими нитридами, в частности с нитридами, богатыми азотом.

Литература

1. Белый А. В. Ионно-лучевое азотирование металлов, сплавов и керамических материалов. Минск: Беларус. навука, 2014. 411 с.
2. Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Кн. 2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки / В. Е. Овчаренко и [др.]; редкол.: С. А. Астапчик [и др.]. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2014. С. 238–247.

3. Фазовые и структурные превращения в материалах на основе железа, подвергнутых низкоэнергетической имплантации азотом при высоких плотностях тока / Белый А. В [и др.] // Физика металлов и металловедение. 1995. Т. 80. № 6. С. 82–95.

4. Belyu A. V., Lobodaeva O. V., Shykh S. K. Solid-state amorphization of a tool steel by high-current-density low-energy nitrogen ion implantation // NIMB Beam Interactions with Materials & Atoms. 1994. Vol. 10. P. 136–139.

5. Tribological Studies of Ion-Implanted Steel Constituents using as Oscillating Pin-on-Disc Wear Tester / Wei R. [et al.] // ASME JOURNAL OF TRIBOLOGY. 1990. Vol. 112. P. 27–36.

References

1. Belyu A. V. *Ionno-luchevoe azotirovanie metallov, splavov i keramicheskikh materialov* [Ion-beam nitriding metal, alloys and ceramic materials]. Minsk, Belarus. navuka Publ., 2014. 411 p.

2. Ovcharenko V. E., Ivanov Yu. F., Belyu A. V. *Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov. Kn. 2. Tekhnologii i oborudovanie mekhanicheskoy i fiziko-tekhnicheskoy obrabotki* [Modern methods and technologies of creation and processing of materials. Bk. 2. Technology and equipment for mechanical and physical-technical processing]. Minsk, FTI NAN Belarusi Publ., 2014, pp. 238–247.

3. Belyu A. V., Kukareko V. A., Lobodaeva O. V., Shykh S. K. Phase and structural changes in materials, based on iron, low energy implantation subjected to nitrogen at high current densities. *Fizika metallov i metallovedenie* [The Physics of Metals and Metallography], 1995, 80, no. 6, pp. 82–95.

4. Belyu A. V., Lobodaeva O. V., Shykh S. K. Solid-state amorphization of a tool steel by high-current-density low-energy nitrogen ion implantation // NIMB Beam Interactions with Materials & Atoms. 1994, vol. 10, pp. 136–139.

5. Wei R., Wilbur P. J., Sampath W. S., Williamson D. L., Qu Y., Wang L. Tribological Studies of Ion-Implanted Steel Constituents using as Oscillating Pin-on-Disc Wear Tester // ASME JOURNAL OF TRIBOLOGY, 1990, vol. 112, pp. 27–36.

Информация об авторах

Белый Алексей Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом физико-технического института Национальной академии наук Беларуси (220141, г. Минск, ул. Купревича, 10, Республика Беларусь). phti@belhost.by

Гаранин Виктор Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: garanin@wmt.by

Гришкевич Александр Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dosy@belstu.by

Аникеенко Андрей Федорович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: hasper@tut.by

Information about the authors

Belyu Aleksey Vladimirovich – DSc (Engineering), Professor, Head of the Department of Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich str., 220141, Minsk, Belarus). E-mail: phti@belhost.by

Garanin Viktor Nikolaevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: garanin@wmt.by

Grishkevich Aleksandr Aleksandrovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, Head of the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dosy@belstu.by

Anikeenko Andrey Fedorovich – PhD (Engineering), Senior Lecturer, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: hasper@tut.by

Поступила 16.02.2016