

УДК 621.901

УПРОЧНЕНИЕ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ПОКРЫТИЯМИ

СКОБЛО Т. С¹, *д. т. н., профессор*,
 РОМАНЮК С. П.^{2*}, *аспирант*,
 СИДАШЕНКО А. И.³, *к. т. н., профессор*,
 МУРАТОВ Р. М.⁴, *инженер*

¹ Кафедра технологических систем ремонтного производства, Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени П. Василенко, ул. Артема, 44, г. Харьков, 61002, Украина, тел. +38 067-289-40-98; e-mail : stamarasemenovna@mail.ru

^{2*} Кафедра технологических систем ремонтного производства, Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени П. Василенко, ул. Артема, 44, г. Харьков, 61002, Украина, тел. +38 050-302-40-81; e-mail : svetlana_rom123@ukr.net ORCID ID : 0000-0002-9226-2205

³ Кафедра технологических систем ремонтного производства, Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко, ул. Артема, 44 г. Харьков, Украина, тел. +38 057-732-79-22; e-mail : tservis@ticom.kharkov.ua

⁴ Институт физики плазмы, ННЦ Харьковский физико-технический институт, ул. Академическая, 1, г. Харьков, 61108, Украина; e-mail : muratov@kipt.kharkov.ua

Аннотация. Постановка проблемы. Существующая эксплуатационная стойкость дисковых тонкостенных ножей не удовлетворяет требованиям кондитерского производства и ее обеспечили дополнительным упрочнением нанопокрывтием с одной стороны (режущей кромки и основания). При этом эффективным является нанесение покрытия на основание ножа как в виде ребер жесткости, так и сплошным. Для этого нанесено покрытие WC толщиной 20...100 нм. Оно получено методом PVD с применением ВЧ разряда в стационарном внешнем магнитном поле. **Цель.** Повышение эффективности предложенной технологии упрочнения напылением с формированием нанопокрывтия из WC для обеспечения стабильной работы ножей. **Методика.** Предложен комплексный подход для оценки влияния покрытия на эксплуатационную стойкость ножей, который включает особенности формируемого типа и количества фаз в покрытии, их свойства и поведение при деформации, износе. Для описания фазового состава предложен новый метод математической обработки металлографических изображений структур. **Результаты.** Изучены особенности распределения компонентов в нанопокрывтии при рекомендуемых параметрах обработки, которые тормозят быструю деградацию изделия в процессе эксплуатации. **Научная новизна.** Определен характер поведения материала при деформации до и после нанесения покрытий. Рекомендуемые параметры упрочнения обеспечивают стабильность карбидной фазы W₂C, WC, WC_{1-x} и промежуточных карбидов, содержащих W-Fe-C. **Практическая значимость.** Предложен новый технологический процесс упрочнения тонкостенного инструмента нанопокрывтием WC, который обеспечивает повышение эксплуатационной стойкости в 10...20 раз по сравнению с дисковыми ножами из исходного материала (сталь 65Г после закалки и отпуска). Это достигнуто за счет стабильности структуры при эксплуатации, уменьшения склонности к повреждаемости режущей кромки и сопротивления усталостному разрушению основной его части. Покрытия обеспечили повышение коррозионной стойкости и самозатачивание ножей.

Ключевые слова: нанопокрывтие; режущий инструмент; микротвердость; структура; фазовый состав; самозатачивание; пластическая деформация; повреждаемость.

ЗМІЦНЕННЯ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ ПОКРИТТЯМИ

СКОБЛО Т. С¹, *д. т. н., професор*,
 РОМАНЮК С. П.^{2*}, *аспірант*,
 СИДАШЕНКО О. І.³, *к. т. н., професор*,
 МУРАТОВ Р. М.⁴, *інженер*

¹ Кафедра технологічних систем ремонтного виробництва, Харківський національний технічний університет сільського господарства імені П. Василенка, вул. Артема, 44, м. Харків, 61002, Україна, тел. +38 067-289-40-98; e-mail : stamarasemenovna@mail.ru

^{2*} Кафедра технологічних систем ремонтного виробництва, Харківський національний технічний університет сільського господарства імені П. Василенка, вул. Артема, 44, м. Харків, 61002, Україна, тел. +38 057-732-98-54; e-mail : svetlana_rom123@ukr.net, ORCID ID : 0000-0002-9226-2205

³ Кафедра технологічних систем ремонтного виробництва, Харківський національний технічний університет сільського господарства імені П. Василенка, вул. Артема, 44, м. Харків, 61002, Україна, тел. +38 057-732-79-22; e-mail : tservis@ticom.kharkov.ua

⁴ Інститут фізики плазми, ННЦ Харківський фізико-технічний інститут, вул. Академічна, м. Харків, 161108, Україна; e-mail : muratov@kipt.kharkov.ua

Анотація. Постановка проблеми. Існуюча експлуатаційна стійкість дискових тонкостінних ножів не задовольняє вимогам кондитерського виробництва і її забезпечили додатковим зміцненням нанопокриттям з одного боку (різальної кромки та основи). При цьому ефективним є нанесення покриття на основу ножа як у вигляді смуг жорсткості, так і суцільним. Для цього нанесено покриття WC товщиною 20...100 нм. Його отримано методом PVD із застосуванням ВЧ розряду в стаціонарному зовнішньому магнітному полі. **Мета.** Підвищення ефективності запропонованої технології зміцнення напиленням із формуванням нанопокриття з WC для забезпечення стабільної роботи ножів. **Методика.** Запропоновано комплексний підхід до оцінки впливу покриття на експлуатаційну стійкість ножів, який включає особливості формованого типу та кількості фаз у покритті, їх властивості та поведінку в умовах деформації, зносу. Для опису фазового складу запропоновано новий метод математичної обробки металографічних зображень структур. **Результати.** Вивчено особливості розподілу компонентів у нанопокритті при рекомендованих параметрах обробки, які гальмують швидку деградацію виробу в процесі експлуатації. **Наукова новизна.** Визначено характер поведінки матеріалу в умовах деформації до і після нанесення покриттів. Рекомендовані параметри зміцнення забезпечують стабільність карбідної фази W_2C , WC, WC_{1-x} та проміжних карбідів, що містять W-Fe-C. **Практична значимість.** Запропоновано новий технологічний процес зміцнення тонкостінного інструменту нанопокриттям WC, який забезпечує підвищення експлуатаційної стійкості в 10...20 разів порівняно з дисковими ножами з вихідного матеріалу (сталь 65Г після загартування та відпуску). Це досягнуто за рахунок стабільності структури в процесі експлуатації, зменшення схильності до пошкоджуваності різальної кромки й опору втомному руйнуванню основної його частини. Покриття забезпечили підвищення корозійної стійкості та самозагострювання ножів.

Ключові слова: нанопокриття; різальний інструмент; мікротвердість; структура; фазовий склад; самозагострювання; пластична деформація; пошкоджуваність.

HARDENING OF THE CUTTING TOOL BY THE COATINGS

SKOBLO T. S.¹, *Dr. Sc/ (Tech.), Prof.*,
ROMANIUK S. P.^{2*}, *graduate student*,
SIDASHENKO A. I.³ *Cand. Sc. (Tech.), Prof.*,
MURATOV R. M.⁴, *engineer*

¹ Department of Technological Systems Repair Production, Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, 44 Artyoma str., Kharkiv, 61002, Ukraine, tel. +38 067-289-40-98; e-mail : stamarasemenovna@mail.ru

^{2*} Department of Technological Systems Repair Production, Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, 44 Artyoma str., Kharkiv, 61002, Ukraine, tel. +38 057-732-98-54; e-mail : svetlana_rom123@ukr.net,
ORCID ID : 0000-0002-9226-2205

³ Department of Technological Systems Repair Production, Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, 44 Artyoma str., Kharkiv, 61002, Ukraine, tel. +38 057-732-79-22; e-mail : tservis@ticom.kharkov.ua

⁴ Institute of plasma physics, National Science Center Kharkov Institute of Physics and Technology, 1, Akademicheskaya St., Kharkov, 61108, Ukraine; e-mail : muratov@kipt.kharkov.ua

Abstract. Raising of problem. The existing operational stability of the thin-walled circular knife does not satisfy the requirements of the confectionery production and it has been provided with additional reinforcement by the nanocoating on one side (the cutting edge and the basis). At that the effective application is the coating on the basis blade both in the form of ribs, as well as continuous coating. For this the WC coating of 20...100 nm thickness has been applied. It was obtained by the PVD method using RF discharge in a stationary external magnetic field. **Aim.** Improving the efficiency of the proposed technology of hardening by spraying with the formation of WC nanocoating to provide the stable operation of knives. **Technique.** A combined approach has been proposed for estimation of the coating influence on operation durability of knives, which includes features of the formed type and number of phases in the coating, their properties and behavior during deformation, wear. For the description of the phase composition the new method of mathematical processing of the metallographic structure images has been proposed. **Results.** Features of the components distribution in the nanocoating at recommended processing parameters, which inhibit rapid degradation of the product during operation, have been studied. Scientific novelty. Nature of material behavior during the deformation before and after application of has been defined. Recommended parameters of hardening provide stability of the carbide phase W_2C , WC, WC_{1-x} and intermediate carbide containing the W-Fe-C. **Practical importance.** The new technological process of hardening of the thin-walled cutting tool by the WC nanocoatings has been proposed, which provides increasing of operational durability by 10...20 times compared with disk knives of the source material (steel 65G after annealing and tempering). It was achieved due to the stability of the structure at operation, decreasing of the inclination to destruction of the cutting edge and resistance to fatigue damage of its main part. The coatings provided the increasing of corrosion resistance and self-sharpening of the knives.

Keywords: nanocoating; cutting tools; microhardness; structure; phase composition; self-sharpening; plastic deformation; damageability.

Постановка проблеми

Дисковые ножи для переработки орехов в кондитерском производстве изготавливают из холоднокатаной стали толщиной 0,64 мм. В процессе эксплуатации их изнашивание сопровождается локальным изменением структуры и формированием новых фаз [7]. Даже небольшое изменение свойств поверхностного слоя резко меняет эксплуатационные свойства режущего инструмента и качество перерабатываемого сырья. Кроме того, современное оборудование для переработки такой продукции не оснащено магнитными ловушками для удаления частиц металла в случае повреждения и выкрашивания режущей кромки ножа. Такая повреждаемость возможна при попадании твердых частиц в перерабатываемое сырье, например, камешков или скорлупы орехов. При этом может происходить разрушение не только одного ножа, но и нескольких из всего одновременно работающего комплекта (48 шт.). Для повышения износостойкости такого инструмента в перерабатывающей промышленности необходимо дополнительное упрочнение ножей.

Цель

Целью работы является повышение эффективности предложенной технологии упрочнения напылением с формированием нанопокрyтия из WC для обеспечения стабильной работы ножей.

В работе исследовали режущий инструмент для дробления орехов в кондитерском производстве, изготовленный из холоднокатаной тонколистовой стали 65Г. Диаметр ножей составляет 76 мм с отверстием 32 мм и толщиной 0,64 мм.

В задачу исследований входило определение изменений структуры и свойств металла режущего инструмента при данном методе упрочнения.

Повысить износостойкость режущего инструмента можно с помощью различных методов упрочнения в зависимости от материала и условий эксплуатации [6; 9–12]. Одним из наиболее перспективных является ионно-вакуумная технология нанесения покрытий [13]. Метод физического осаждения из паровой фазы PVD обеспечивает получение достаточно равномерных поверхностных слоев толщиной от 1 нм до 200 мкм.

Основными свойствами, которые могут обеспечить такие покрытия, являются :

- высокая твердость, превышающая показания, которые соответствуют материалу термоупрочненного ножа (закалка);
- устойчивость к разрушению при колебании температур и напряжений;
- совместимость свойств покрытия со свойствами материала ножа;
- достаточная сплошность покрытия по всей упрочняемой поверхности;

- стабильность свойств покрытия при эксплуатации;
- повышенная коррозионная стойкость;
- обеспечение эффекта самозатачивания режущего инструмента.

Методика получения материала и методы исследований

Для повышения эксплуатационной стойкости и стабильности структурных составляющих ножей из стали 65Г проведено упрочнение, уменьшающее склонность карбидной фазы при эксплуатации к деградации за счет снижения диффузии углерода.

Напыление покрытия из WC проведено на установке, разработанной в ННЦ ХФТИ (г. Харьков) [1]. Упрочнение осуществляли с одной стороны для обеспечения при эксплуатации эффекта самозатачивания.

На поверхность режущего инструмента при помощи ВЧ разряда в стационарном внешнем магнитном поле распыляли композиционный материал C + W (50 % + 50 %). Покрытия наносили с использованием установки типа "Булат-6" (рис. 1) методом PVD, при котором формируются покрытия путем прямой конденсации испаряемого материала. Важным этапом в нанесении покрытия является тщательная подготовка рабочей поверхности.

Очистку поверхности перед напылением проводили бомбардировкой ионами Ag в ВЧ-плазме (1 kV). Для осуществления процесса подложкодержатель присоединяли к ВЧ-генератору с закрытым входом. Напряжение смещения составляет $E_{см} = -1\ 000\ В$. В вакуумную камеру подается аргон при давлении $P_{Ar} = 8 \cdot 10^{-3}$ Торр. Время очистки 5...10 мин.

Для нанесения покрытия использовали сложный электрод из C + W. Электрод подключается к ВЧ-генератору с закрытым входом и производится его распыление в среде Ag при давлении $P_{Ar} = 3 \cdot 10^{-3}$ Торр. Отрицательное смещение на ВЧ-электроде $E_{см} = -700\ В$. Время нанесения покрытия составляет 1 ч. Расстояние между ВЧ-электродом и образцом достигает 4 см. Внешнее магнитное поле ~ 30 эрстед. Толщина полученного нанопокрyтия C + W составляет 20...50 нм. Регулировать толщину нанопокрyтия можно временем нанесения. За 2 ч напыления было получено покрытие толщиной 100 нм.

Исследование структуры и однородности химического состава ножа с покрытием проводили на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6390LV при ускоряющем напряжении 10 kV. При этом распределение компонентов в покрытии оценивали методом термоэлектронной эмиссии.

Измерения микротвердости проводили на автоматизированном микротвердомере по методу Виккерса с автоматическим получением отпечатка и расчетом твердости.

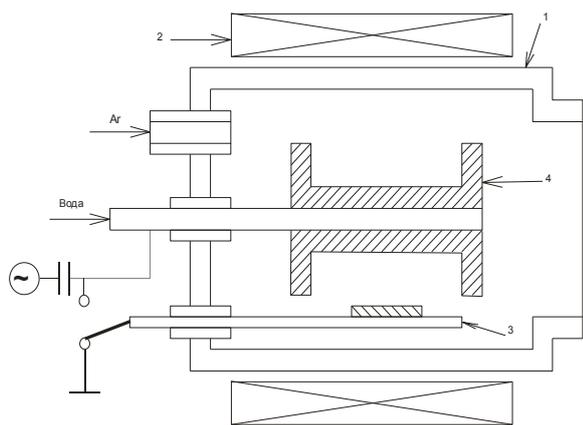


Рис. 1. Схема експериментальної установки:
 1 – вакуумна камера; 2 – соленоїд, що створює зовнішнє магнітне поле; 3 – підложкодержатель з образцом; 4 – ВЧ-електрод з C + W, для распылення / Experimental setup :
 1 – the vacuum chamber; 2 – solenoid generates an external magnetic field; 3 – substrate holder with the sample; 4 – HF electrode C + W, spray

Для описання процесів структуроутворення використовували розроблену раніше методику [8], яка дозволяє якісно і кількісно визначити фазовий склад і співвідношення структурних складових, формуваних в процесі нанесення покриття.

Результати досліджень і їх обговорення

Зовнішній вигляд поверхні дискового ножа з покриттям з WC представлений на рисунку 2.



Рис. 2. Поверхня дискового ножа з покриттям WC / The surface of the circular knife with WC covering

С допомогою термоелектронної емісії була досліджена однорідність розподілу компонентів покриття по упрочненій поверхні дискового ножа (рис. 3).

Із результатів, представлених на рисунку 3, можна зробити висновок, що компоненти W і C розподілені рівномірно по всій поверхні. Наблюдается диффузія атомів заліза з основного металу в покриття по границям зерен, концентрація якого в різних зонах досягає 2,51–3,83 %.

Вимірювання мікротвердості покриття C + W були проведені при різних навантаженнях індентора : 0,098; 0,245; 0,490 N (рис. 4).

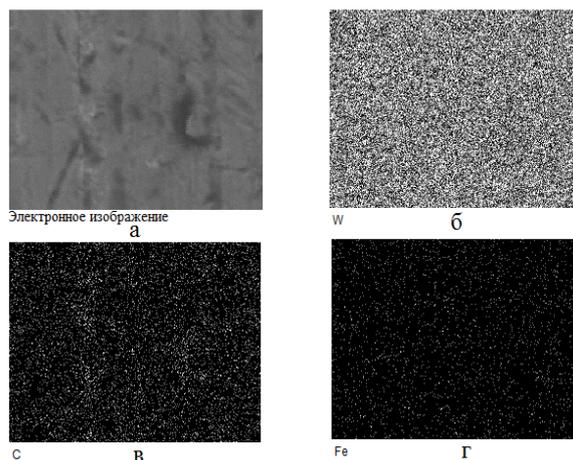


Рис. 3. Розподіл компонентів покриття по поверхні ножа / Distribution of the coating components on the surface of the knife

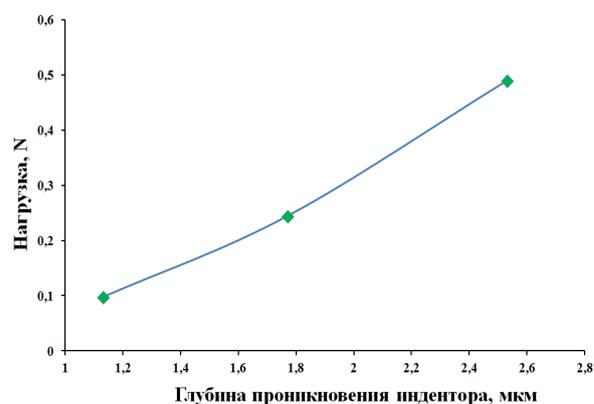


Рис. 4. Залежність глибини проникнення індентора від величини навантаження / Dependence of the penetration depth indenter from amount of load

Сопоставительно аналізували поверхню одного і того ж ножа з різних сторін: з нанесеним покриттям і без нього. Отримані усереднені дані по мікротвердості ножа приведені в таблиці.

Таблиця

Результати вимірювання мікротвердості / Results of microhardness measurements

Навантаження, N	Глубина проникнення, мкм		Середня мікротвердість, HV	
	з покриттям	без покриття	з покриттям	без покриття
0,245	1,77	1,95	609,65	500,4
0,490	2,53	2,62	591,75	556,4

Сопоставительные дані по вимірюванню мікротвердості показали суттєве різниця в значеннях з різних сторін ножа (упрочнених і не упрочнених). Нанесення нанопокриття сприяє збільшенню мікротвердості поверхні режущого інструмента. Середнє

значення мікротвердості дискового ножа з покриттям WC при нарузці 0,098 збільшилося на 25,6 % (для показаній характерен большой разброс значений), что связано с изменением доли карбидов W-Fe-C в промежуточном слое.

При нарузці 0,245 N получено збільшення мікротвердості на 21,83 % по сравнению с исходной.

В процесі досліджень аналізували вплив неоднорідності товщини (20...50 нм) покриття WC на значення мікротвердості (рис. 5) при однаковій оптимальній нарузці (0,245 N).

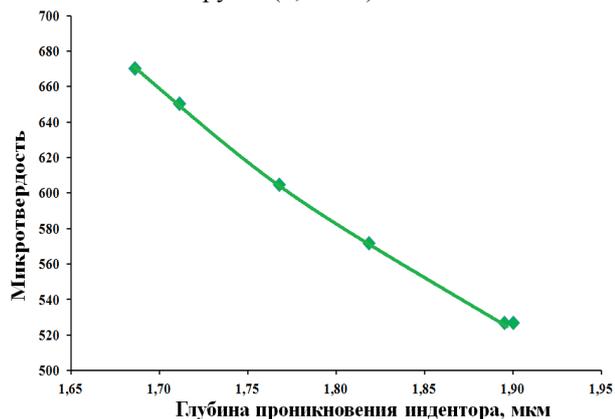


Рис. 5. Изменение значений микротвердости ножа с покрытием WC при нарузці 0,245 N / Changing the values of the microhardness the knife with WC coated at a load 0,245N

Из рисунка 5 видно, что микротвердость нанесенного покрытия WC уменьшается с увеличением глубины проникновения индентора. Это связано с неоднородностью толщины нанесенного покрытия 20...50 нм. Чем она меньше, тем ниже микротвердость.

Для того чтобы оценить возможность использования ионно-плазменных покрытий, необходимо установить формируемые основные фазы, закономерности образования различных структурных составляющих.

Анализировали изображения (микрофотографии) ножей с покрытием, полученные с оптического и электронного микроскопов. Исследования образцов при микрорентгеноспектральном анализе получены с глубины до 1 мкм, превышающей толщину покрытия. Это позволяет оценить и сравнить совместно наличие и распределение компонентов в покрытии и подслое.

Для оценки фазового состава использовали специально разработанную программу математического описания фаз [8], которая включает 256 (оттенков от черного до белого) цветов от 0 до 255. По результатам вычислений построены гистограммы распределения цвета по фотографиям микроструктур режущего инструмента (рис. 6). При этом оценивали не сам цвет, а разницу между ними. Это позволяет не учитывать степень травимости структуры.

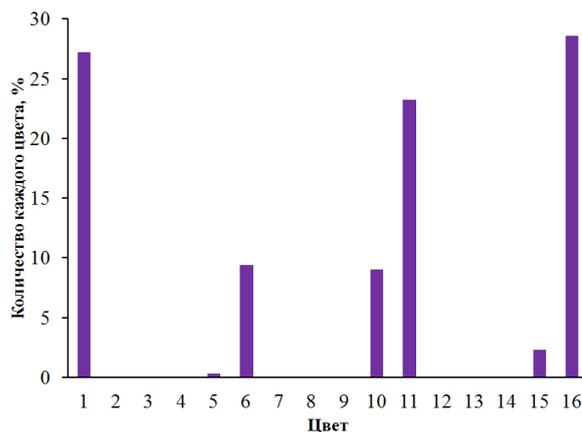


Рис. 6. Гистограмма распределения структурных составляющих ножей из стали 65Г с покрытием WC :

1 – чистый компонент основы покрытия;
5–10 – нестабильные соединения W-Fe-C (основа), а также включающие W; 11–16 – карбиды отличающихся типов /
Histogram of distribution of structural components of the knives of 65G steel the WC coated :
1 – pure component coating base; 5–10 – unstable compounds W-Fe-C (base), and also includes W; 11–16 – carbides differing types

Основной компонент нанопокртия – вольфрам является карбидообразующим элементом. Структуре и свойствам формируемых фаз системы W-C (W_2C ; WC; WC_{1-x}), посвящено большое количество работ (около 500) [14]. В данной работе с помощью термоэлектронной эмиссии (рис. 3) было исследовано распределение компонентов покрытия. Результаты показали наличие Fe, которое, большей частью, выделяется по границам зерен. В системе железо – вольфрам – углерод имеются три двойных и два тройных карбида [2; 4].

На основании анализа литературных данных и полученных результатов математической обработки изображений (рис. 6) показано, что карбидная составляющая нанопокртия состоит из карбидов вольфрама с различной концентрацией углерода и их количество следующее : WC – 23,2 % (цвет 11), W_2C – 28,6 % (цвет 16). Предположительно, цвет 15 соответствует карбиду WC_{1-x} .

Одним из тройных карбидов системы железо – вольфрам – углерод является кубический гранцентрированный $(W, Fe)_6C$ и ему приписывается состав Fe_4W_2C и Fe_3W_3C , а другим – $(W, Fe)_{23}C_6$. По результатам математической обработки изображений их количество составляет: Fe_4W_2C – 9,4 % (цвет 6), Fe_3W_3C – 9,0 % (цвет 10) и $(W, Fe)_{23}C_6$ 0,3 % (цвет 5).

Карбиду $(W, Fe)_{23}C_6$ приписывается состав $W_2Fe_{21}C_6$ и образуется он лишь как метастабильная переходная фаза [3]. Чистого компонента W – 27,2 % (цвет 1).

Напылением покрытия на поверхность дискового ножа обеспечивается повышение твердости и

стабільність структури, прешаючу пластической деформации в режущем инструменте (рис. 7).

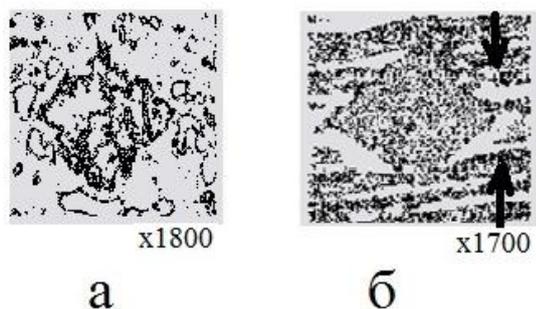


Рис. 7. Характер изображения отпечатков без покрытия (а) и с – покрытием WC (б) (формируемый рельеф индентирования): стрелками указаны полосы скольжения в покрытии / Character the image of prints without coating (a) and with – WC coating (b) : the arrows indicate the slip bands in the coating

На рисунке 7 видно, что вокруг отпечатка индентора в структуре без покрытия наблюдаются зоны пластической деформации («бугры» вокруг отпечатка), чего не происходит при наличии покрытия, где деформационные области отсутствуют. Наличие полос скольжения без выдавливания металла при индентировании свидетельствует об ином поведении материала при трении. При нанесении покрытия поверхность лучше сопротивляется пластической деформации. Это также подтверждено данными исследований по наноиндентированию с определением упругих свойств покрытия (модуля упругости, индекса пластичности и упругого восстановления отпечатка).

Промышленные испытания режущего инструмента с нанопокрывтием WC толщиной 20–100 нм в виде ребер жесткости или сплошного покрытия, проведенные на кондитерской фабрике «Харьковчанка» при переработке орехов, показали увеличение износостойкости и сопротивляемости усталостной повреждаемости в 10...20 раз по сравнению с дисковыми ножами из исходного материала (сталь 65Г после закалки и отпуска). Причем максимальная износостойкость характерна для ножей с покрытием до 100 нм. Новый технологический процесс упрочнения защищен патентом Украины [5]. За период эксплуатации разрушений таких ножей не отмечалось. Ножи снимали с эксплуатации из-за износа покрытия и деформации тонкой части лезвия. Повышение эксплуатационной стойкости достигнуто за счет стабильности структуры при эксплуатации, уменьшения склонности к повреждаемости режущей кромки и сопротивления усталостному разрушению основной его части. Нанесенные покрытия с предварительной ВЧ-обработкой обеспечили повышение коррозионной стойкости и самозатачивание ножей.

Научная новизна и практическая значимость

Определен характер поведения материала до и после нанесения покрытий, которые обеспечивают стабильность свойств в процессе эксплуатации.

Нанесение упрочняющего покрытия позволило повысить эксплуатационную стойкость дисковых ножей в 10...20 раз за счет формирования карбидов вольфрама с различной концентрацией углерода (W_2C , WC, WC_{1-x} и промежуточных карбидов W–Fe–C).

Выводы

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к упрочняющим покрытиям, которые целесообразно обеспечить для ножей, было установлено следующее:

1. При нанесении покрытия состава W + C в соотношении 50 % + 50 % методом PVD с применением ВЧ разряда в стационарном внешнем магнитном поле было показано, что компоненты W и C распределены достаточно равномерно по всей поверхности. Толщина полученного покрытия составляет 20...100 нм.

2. Сравнительным анализом показателей микротвердости покрытия и основного металла режущего инструмента, выявлено повышение его уровня при нагрузке 0,245 N на 21,83 % по сравнению с исходной.

3. Исследованием структуры покрытия WC и основного металла режущего инструмента выявлено различное процентное содержание исходных фаз. Имеет место диффузия атомов железа по границам зерен в покрытие. Одновременно в покрытии выявлено три типа специальных карбидов W_2C , WC и промежуточного по содержанию углерода и вольфрама WC_{1-x} .

4. Установлено, что нанесение покрытия обеспечивает повышение стабильности структуры, препятствует окислению, пластической деформации режущего инструмента, увеличивает износостойкость и сопротивляемость усталостной повреждаемости.

5. Эффект самозатачивания режущего инструмента с покрытием WC обеспечивается благодаря упрочнению ножей с одной стороны.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Андреев А. А. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия / А. А. Андреев, В. П. Саблев, В. М. Шулаев, С. Н. Григорьев. – Харьков : ННЦ «ХФТИ», 2005. – 235 с.

Vakuumno-dugovye ustrojstva i pokrytiya [Vacuum arc devices and coatings] / A. A. Andreev, V. P. Sablev, V. M. SHulaev, S. N. Grigor'ev. – Har'kov : NNC «HFTI», 2005. – 235 p.

<http://www.twirpx.com/file/1472331/>

2. Гудремон Э. Специальные стали. Том второй. – Москва : Металлургия, 1966. – 1275 с.

Gudremon E. Special'nye stali. [Special steel] Tom vtoroj. Moscow : Metallurgiya Publ., 1966, 1275 p.

<http://www.twirpx.com/file/230594/>

3. Двойные и тройные карбидные и нитридные системы переходных металлов : Справ.изд. Холлек Х. / Пер. с нем. под ред. Левинского Ю. В. – Москва : Металлургия, 1988. – 319 с.

Dvojnye i trojnye karbidnye i nitridnye sistemy perekhodnyh metallov [Double and triple carbide and nitride of transition metals] : Sprav.izd. Hollek H./Per. s nem. Pod red. Levinskogo Yu. V. Moscow : Metallurgiya Publ., 1988, 319 p.

<http://www.twirpx.com/file/106155/>

4. Нарита К. Кристаллическая структура неметаллических включений в стали / К. Нарита; пер. с япон. В. А. Митькина; под. ред. П. П. Арсентьева. – Москва : Металлургия, 1969. – 190 с.

Narita K. Kristallicheskaya struktura nemetallicheskih vkluchenij v stali [Crystal structure of nonmetallic inclusions in steel] / K. Narita; per. s yapon. V. A. Mit'kina; pod. red. P. P. Arsent'eva. Moscow : Metallurgiya Publ., 1969, 190 p.

5. Патент № 95489 Україна, МПК (2015.01) B23P 9/00, C21D 1/00. Спосіб наноструктурного зміцнення тонкостінного різального інструменту / Скобло Т. С., Романюк С. П., Сідашенко О. І., Гаркуша І. Є., Бірка О. В., Муратов Р. М.; заявник та патентотримувач Романюк С. П. № u201407614. заявл. 07.07.2014.; опубл. 25.12.14., Бюл. № 24.

Patent № 95489 Ukraina, MPK (2015.01) V23R 9/00, S21D 1/00. Sposib nanostrukturnogo zmichnennya tonkostinnogo rizhuchogo instrumentu [Method of nanostructured hardening of the thin-walled cutting tool] / Skoblo T. S., Romanyuk S. P., Sidashenko O. I., Garkusha I. E., Birka O. V., Muratov R. M.; zayavnik ta patentotrimuvach Romanyuk S. P. № u201407614. zayavl. 07.07.2014.; opubl. 25.12.14., Byul. № 24.

<http://www.uipv.org/>

6. Романюк С. П. Анализ методов упрочнения режущих инструментов // Вісник ХНТУСГ : [«Ресурсозберігальні технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві»]. – Вип. 133. – Харків, 2013. – С. 136–142.

Romanyuk S. P., Analiz metodov uprochneniya rezhushchih instrumentov [Analysis of strengthening cutting tools methods] // Visnik HNTUSG: [«Resursozberigayuchi tekhnologii, materialy ta obladnannya u remontnomu virobnictvi»]. Vyp. 133. Harkiv, 2013. Pp. 136–142.

www.khntusg.com.ua/files/sbornik/vestnik_133/21.pdf

7. Скобло Т. С. Процессы, происходящие в тонкостенных ножах при их изготовлении и эксплуатации / Т. С. Скобло, С. П. Романюк, Е. Л. Белкин, А. И. Сидашенко // Промышленность в ФОКУСЕ.– 2014. – № 3. – С. 54–57.

Skoblo T. S. Processy, proishodjashhie v tonkostennyh nozhah pri ih izgotovlenii i jekspluatcii [Processes occurring in the thin walled knives during their manufacture and

operation] / T. S. Skoblo, S. P. Romanjuk, E. L. Belkin, A. I. Sidashenko // Promyshlennost' v FOKUSE. – 2014. – № 3. – Pp. 54–57.

<http://vfocuse.com.ua/years/2014>

8. Скобло Т. С. Применение компьютерного анализа металлографических изображений при исследовании структуры высокохромистого чугуна / Т. С. Скобло, О. Ю. Клочко, Е. Л. Белкин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012. – № 6 (78). – С. 35–42.

Skoblo T. S. Primenenie komp'yuternogo analiza metallograficheskikh izobrazhenij pri issledovanii struktury vysokohromistogo chuguna [The use of computer analysis of metallographic images in the study of the structure of high chrome cast iron] / T. S. Skoblo, O. Yu. Klochko, E. L. Belkin // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. – 2012. – № 6 (78). – S. 35–42.

<http://zldm.ru/content/article.php?ID=1398>

9. M. Nastasi, W. Moller, W. Ensinger. Ion implantation and thin-film deposition // Handbook of plasma immersion, ion implantation and deposition. Edited by A. Anders. N. Y., USA, 2000. 736 p.

10. Patent US 4450205 A C23C14/16, C23C14/06E, C23C30/00B, C23C14/06G, C23C14/02B2, C23C14/06, C23C14/06F. Vapor-deposited layer of titanium between substrate and layer of titanium carbide or nitride; bonding / Takeshi Itaba, Shotaro Matsumoto, Takeshi Abe.- Application number US 06/399,802, Filing date July 19, 1982, Publication date May 22, 1984.

www.google.com.ar/patents/US4450205

11. Patent US 4945640 A C23C30/00B, C23C16/30, C23C28/00, C23C16/32, C23C16/08, C23C16/14. Multilayer; noble metal base, exterior overcoating of mixture of tungsten and tungsten carbide / Diwakar Garg, Carl F. Meuller, Ernest L. Wreccics, Paul N. Dyer, Mark A. Pellman. Application number US 07/319,774, Filing date Mar 7, 1989, Publication date Aug 7, 1990.

www.google.com.ar/patents/US4945640

12. Patent US 5799549 A H01J37/32M4, C23C14/06B2, C23C14/32A, C23C14/06B, C23C14/22D, B26B21/60. Amorphous diamond coating of blades / Thomas G. Decker, Gregory P. Lundie, David L. Pappas, Richard P. Welty, C. Robert Parent, Less. Application number US 08/825,405 Filing date Mar. 27, 1997, Publication date Sep. 1, 1998.

www.google.com.ar/patents/US5799549

13. http://pstu.ru/files/file/adm/abiturientu/obemnye_nanostrukturye_materialy_i_nanostrukturirovannye_pokrytiya.pdf

14. http://www.kamet.com.ua/attachments/article/74/kv_1_2_1.pdf

Статья рекомендована к публикации д-ром. техн. наук, проф. В. А. Войтовым (Украина); д-ром. техн. наук, проф. С. А. Лузаном (Украина)

Статья поступила в редколлегию 08.08.2015