

<p>Романюк С.П. Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко, г. Харьков, Украина E-mail: romaniuk.khntusg@gmail.com</p>	<p>ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА НАНО- И МИКРОУРОВНЕ</p>
---	---

УДК 621.901

Романюк С.П. «Дослідження стабільності властивостей наноструктурних покриттів на нано- та мікрорівні»

В роботі досліджували пакувальні ножі з високолегованої сталі марки X205Cr12KU, які використовуються в машинах типу MC1DT-T (MC Automations, Італія). Запропоновано спосіб підвищення зносостійкості поверхневого робочого шару інструменту зміцнюючим наноструктурним керамічним покриттям ZrO₂, отриманим вакуумно-дуговим методом.

Виконано комплексні дослідження структури і механічних властивостей покриття ZrO₂. Для аналізу фазового і хімічного складу, морфології поверхні, мікроструктури і нанотвердості покриттів застосовувався рентгенофлуоресцентний аналіз (XRF), рентгеноструктурний аналіз (XRD), скануюча електронна мікроскопія (SEM) з мікроаналізом (EDS), метод наноіндентування. Вивчені особливості розподілу компонентів в покритті при рекомендованих параметрах обробки.

Проведено дослідження стабільності властивостей наноструктурного покриття ZrO₂ на нано- та мікрорівні.

Вимірювання мікротвердості покриття ZrO₂ були проведені при різних навантаженнях індентора: 0,245; 0,490; 0,98 N. Виявлена анізотропія властивостей при навантаженні 0,245 N, яка пов'язана з локальною неоднорідністю в розподілі компонентів металу інструмента.

Максимальна нанотвердість покриття ZrO₂ склала 13,78 ГПа з відхиленнями отриманих даних до 4,75%. Високий рівень нанотвердості зміцнюючого покриття ZrO₂ дозволив підвищити зносостійкість поверхневого робочого шару в процесі експлуатації і збільшити час між перезаточуванням інструменту.

Ключові слова: керамічне покриття, структура, неоднорідність, нанотвердість, стабільність властивостей

Романюк С.П. «Исследование стабильности свойств наноструктурных покрытий на нано- и микроуровне»

В работе исследовали упаковочные ножи из высоколегированной стали марки X205Cr12KU, используемые в машинах типа MC1DT-T (MC Automations, Италия). Предложен способ повышения износостойкости поверхностного рабочего слоя инструмента упрочняющим наноструктурным керамическим покрытием ZrO₂, полученным вакуумно-дуговым методом. Выполнены комплексные исследования структуры и механических свойств покрытия ZrO₂. Для анализа фазового и химического состава, морфологии поверхности, микроструктуры и нанотвердости покрытий применялся рентгенофлуоресцентный анализ (XRF), рентгеноструктурный анализ (XRD), сканирующая электронная микроскопия (SEM) с микроанализом (EDS), метод наноиндентирования. Изучены особенности распределения компонентов в покрытии при рекомендуемых параметрах обработки. Проведены исследования стабильности свойств наноструктурного покрытия ZrO₂ на нано- и микроуровне.

Измерения микротвердости покрытия ZrO₂ были проведены при разных нагрузках индентора: 0,245; 0,490; 0,98 N. Степень вертикальной и горизонтальной неоднородности оценивали по анизотропии свойств. Выведена анизотропия свойств при нагрузке 0,245 N, которая связана с локальной неоднородностью в распределении компонентов подложки.

Максимальная нанотвердость покрытия ZrO₂ составила 13,78 ГПа с отклонениями полученных данных до 4,75 %. Высокий уровень нанотвердости упрочняющего покрытия ZrO₂ позволил повысить износостойкость поверхностного рабочего слоя в процессе эксплуатации и увеличить время между перезаточиванием инструмента.

Ключевые слова: керамическое покрытие, структура, неоднородность, нанотвердость, стабильность свойств

Romaniuk S.P. «Study of stability of properties of nanostructural coatings on the nano- and micro level»

In this work the packaging knives made from high-alloy steel of X205Cr12KU type used in wrapping machines of MC1DT-T type (MC Automations, Italy) has been investigated. In order to increase the cutting tool operational stability, the hardening implementation is reasonable. The method is proposed for increasing the wear resistance of the surface working layer of tools by hardening nanostructured ceramic coating. Zirconium dioxide ZrO₂ ceramics possesses high resistance to crack propagation, high fracture toughness, high thermal expansion coefficient ($\alpha = 11 \times 10^{-6}/K$, similar to some types of steel) and due to these properties, it is very much suitable for joining ceramic and steel. The ZrO₂ coatings were obtained in "Bulat" type device by condensing vacuum-arc plasma purified from macro-particulates by means of the curvilinear filter

Comprehensive studies of the structure and mechanical properties of the ceramic coating have been carried out. Structure examinations – X-ray fluorescent analysis (XRF), X-ray diffraction analysis (XRD), scanning electron microscopy (SEM) with microanalysis (EDS), nanoindentation method – were performed to study phase and chemical composition, surface morphology, microstructure and nanohardness of coatings. Features of the components distribution in the coating at recommended processing parameters have been studied. SEM investigations revealed the formation of crack-free structure of the film. XRD data revealed the formation of fine-crystalline structured films with average grain size of ~25 nm.

The stability of the properties of the nanostructured ZrO₂ coating on the nano- and micro levels has been studied. Application of nano-coating helps to increase the micro- and nanohardness of surface of the cutting tool. Measurements of microhardness of the ceramic coating has been carried out under different loads of indenter: 0,245; 0,490; 0,98 N. The degree of vertical and horizontal heterogeneity was assessed by the anisotropy of the properties. Anisotropy of the properties was detected under a load of 0.245 N, which is associated with local heterogeneity in the distribution of the components of the substrate.

The nanohardness was measured by Nanoindenter G200 (USA). The maximum nanohardness of ZrO₂ coating comprised 13,78 GPa with the data spread 4,75 %. The high level of nanohardness of hardening ceramic coating allowed to increase the wear resistance of the working surface layer in operation and to increase the time between tool retooling.

Keywords: ceramic coating, structure, heterogeneity, nanohardness, stability of properties

Актуальность проблемы

Срок службы инструмента из стали Х12 и качество выпускаемой продукции зависят, в первую очередь, от стабильности структурных составляющих ножа и однородности его поверхностных свойств при эксплуатации [1]. Постепенно развиваются процессы, приводящие к потере жесткости, стабильности в работе и, в конечном итоге, к повреждаемости и разрушению инструмента. Применение дополнительного упрочнения позволит повысить эксплуатационную стойкость режущего инструмента и предотвратить выход из эксплуатации всего оборудования.

Анализ исследований и публикаций

Повысить физико-механические характеристики поверхностного рабочего слоя инструмента из стали Х12 можно с помощью специальных параметров обработки. Для этого применяют различные технологические процессы. К ним могут быть отнесены как химико-термическая обработка, так и различные упрочняющие технологии. В настоящее время наибольшее распространение получили современные технологии, позволяющие формировать тонкие слои с заданными свойствами. В зависимости от необходимых целей и задач, для получения металлокерамических защитных покрытий применяют различные методы. К ним относятся: CVD, PVD, в том числе вакуумно-дуговое, электронно-лучевое, лазерное (абляция), термовакuumное (резистивное) испарение; магнетронное распыление; импульсное лазерное осаждение; метод спрей-пиролиза [2-4]. Каждая технология имеет свои преимущества и их используют для изделий, работающих в определенных условиях эксплуатации. Керамические покрытия ZrO₂ используются в качестве износостойких покрытий, а также для коррозионной защиты. Диоксид циркония обладает высокими механическими свойствами, прочностью, устойчивостью к распространению трещин, высокой ударной вязкостью, высоким коэффициентом термического расширения ($\alpha = 11 \times 10^{-6}/\text{K}$) [5-6]. Свойства циркониевой керамики в значительной степени зависят от их фазового состава и микроструктуры.

Цель исследования

Целью работы является исследование стабильности свойств упрочняющего покрытия ZrO₂, полученного вакуумно-дуговым методом на нано- и микроуровне.

Методика исследований

В данной работе проведено исследование ножей для упаковки конфет, установленных на заверточной машине MC1DT-T (производства Италии), изготовленных из инструментальной высоколегированной стали X205Cr12KU (отечественный аналог - X12). Для повышения износостойкости и долговечности инструмента нанесено упрочняющее покрытие ZrO_2 . Оно было получено конденсацией вакуумно-дуговой плазмы очищенной от макрочастиц при помощи криволинейного фильтра на установке «Булат», разработанной в НИЦ ХФТИ (г. Харьков). Образец устанавливался в вакуумной камере на расстоянии 16-18 см от выходного отверстия фильтра. В качестве материала катода использовали химически чистый цирконий (99,999). Камеру предварительно откачивали до давления 6×10^{-5} Торр. К держателю образца было приложено импульсное отрицательное смещение, которое составило 1000 вольт с частотой 50 кГц. Напуск Ar осуществляли до давления $5 \cdot 10^{-4}$ Торр. Зажигание вакуумной дуги происходило при токе 115 А. Очистку поверхности перед напылением проводили бомбардировкой ионами Zr в импульсном режиме: очистка 1,5 секунды и пауза 6 секунд (всего 15 циклов в течение 2 минут). Затем снижали потенциал до -200 Вольт и наносили подслоя чистого Zr в течение 2 минут. Для осаждения диоксида циркония камеру заполняли кислородом до давления $4 \cdot 10^{-3}$ Торр. Наносили покрытие ZrO_2 в течение 12 минут. Толщина наноструктурного покрытия составила $\approx 8,4$ мкм.

Исследования стабильности свойств упрочняющего покрытия ZrO_2 на нано- и микроуровне проводили с использованием комплексного подхода. Для анализа механических свойств упрочняющего покрытия ZrO_2 использовали прибор «Nanoindenter G200» и метод CSM. Измерения микротвердости проводили на автоматизированном микротвердомере по методу Виккерса с автоматическим получением отпечатка и расчетом твердости. Топографию поверхности изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM) JEOL JSM-6390LV при ускоряющем напряжении 15kV и увеличении $\times 2500$, химический состав - с помощью EDS-анализа.

Результаты исследований

Из сопоставительного анализа литературных источников [6] и результатов проведенных исследований [7] структуры полученной пленки ZrO_2 следует, что предложенные параметры технологии осаждения покрытия обеспечивают формирование равновесного и стехиометрического состава. Стабильная моноклинная фаза имеет мелкое зерно и размер кристаллитов пленки оксида циркония 25 нм.

Определение нанотвёрдости покрытия ZrO_2 проводили с помощью прибора «Nanoindenter G200» и метода CSM с автоматической непрерывной записью диаграммы нагружения и разгрузки. В качестве индентора использовали трехгранную пирамиду Берковича (рис.1). Измерения проводили при нагрузке до 40mN с глубиной внедрения индентора до 500нм.

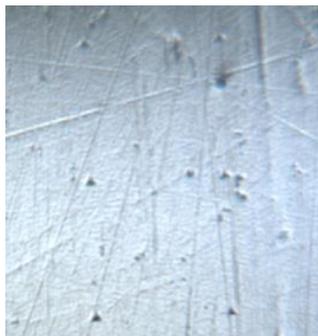


Рис.1. Изображение отпечатков индентора на поверхности инструмента, упрочненного покрытием ZrO_2 , $\times 1000$

При проведении исследований инструмента из стали X12, упрочненного покрытием ZrO_2 , были выполнены измерения (табл.1) и по полученной статистике оценена степень их неоднородности.

Значение нанотвердости оценивали по наиболее стабильным результатам на глубине 200 – 400 нм (рис.2).

Таблица 1

Неоднородность покрытия на наноуровне

№	Нанотвердость, ГПа	Неоднородность, %
1	13,488	2,18
2	13,785	4,43
3	12,979	1,67
4	12,816	2,90
5	13,56	2,73
6	12,573	4,75
Средняя	13,2	3,11

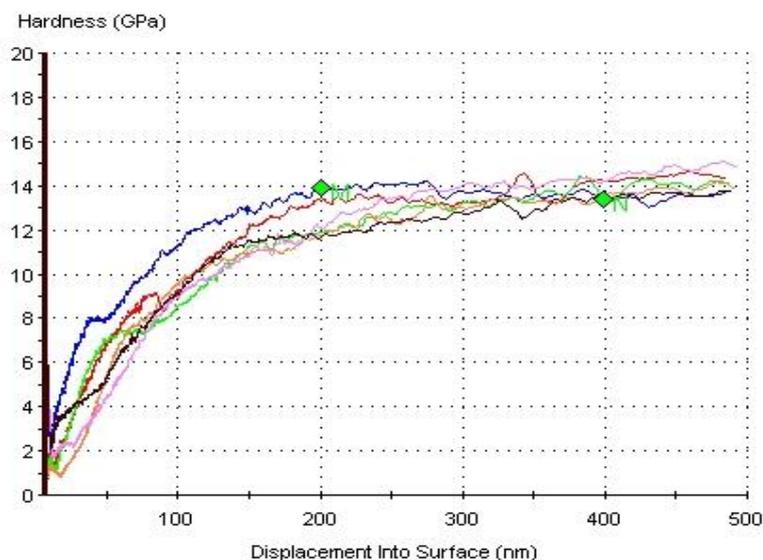


Рис.2. Изменение нанотвёрдости в зависимости от глубины внедрения индентора для ножа с покрытием ZrO_2

Для ножа из стали X12, упрочненного покрытием ZrO_2 среднее значение нанотвердости составило 13,2 ГПа. Неоднородность полученных данных не превышала 4,75 %.

Результаты измерения микротвердости покрытия ZrO_2 , полученные на твердомере микро-Виккерс UIT HVmicro-1, при разных величинах приложенной нагрузки представлены в табл.2.

Среднее значение микротвердости покрытия ZrO_2 при нагрузке 0,245 N составило 1750,96 МПа при максимальном разбросе показаний до 252,66 МПа, что составляет ~ 14,43%. С увеличением нагрузки до 0,49 N наблюдается снижение значения твердости до 1109,56 МПа с одновременным уменьшением разброса данных до 146,66 МПа (~ 13,22%). Наиболее стабильные результаты с отклонением 9,56% выявлены при нагрузке 0,98 N, которые достигают 813,53 МПа. Однако при такой нагрузке существенное влияние оказывает подложка, а локальные изменения в структуре покрытия становятся менее значимыми.

Таблица 2

Результаты измерения микротвердости

№	Микротвердость		Нагрузка
	HV	HRC	
1	1461,2	74,8	0,098N (10г)
1	1642,70	77,10	0,245N (25г)
2	1950,70	> 80	
3	1498,30	75,30	
4	1808,80	79,30	
5	1854,30	79,90	
1	1041,00	69,50	0,49N (50г)
2	1228,50	71,80	
3	1246,30	72,00	
4	1069,10	69,90	
5	962,90	68,40	
1	735,80	61,60	0,98N (100г)
2	845,20	65,40	
3	859,60	65,80	

С повышением нагрузки увеличивается и глубина проникновения индентора в покрытие (рис. 3).

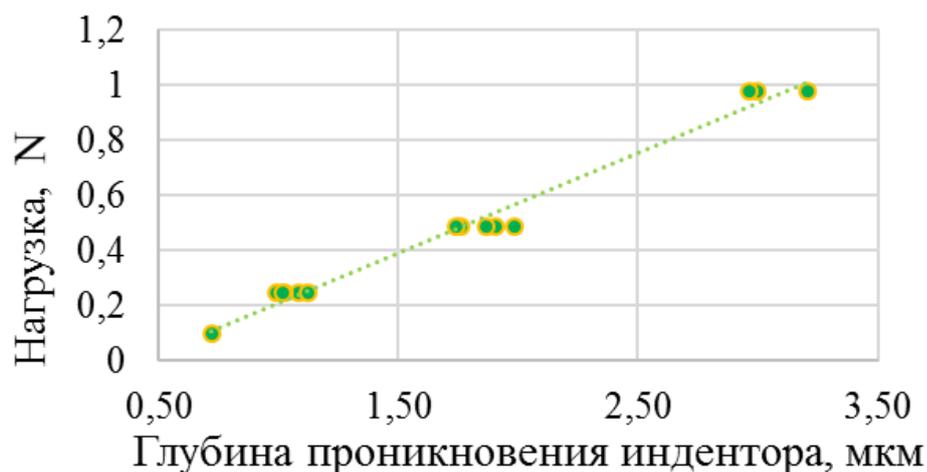


Рис.3. Зависимость глубины проникновения индентора от величины нагрузки

Из рис.3 следует, что максимальная глубина проникновения индентора при измерении микротвердости достигает 3,21мкм и не превышает толщину покрытия ZrO_2 , которая составляет 8,4мкм. Микроуровень, в большей мере, характеризует начальное стартовое состояние рабочей поверхности перед эксплуатацией. Следовательно, это также дает возможность с помощью метода измерения микротвердости проанализировать и анизотропию свойств покрытия ZrO_2 на микроуровне.

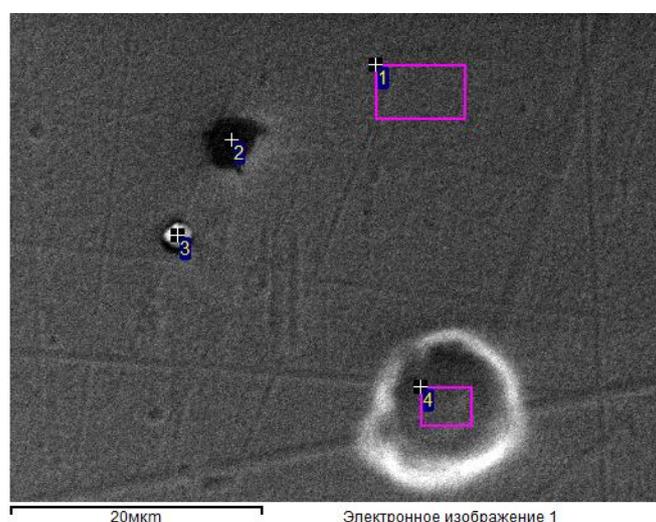
Степень вертикальной и горизонтальной неоднородности оценивали по анизотропии свойств. Данный показатель анализировали при разных величинах приложенной нагрузки. Полученные результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Вертикальная и горизонтальная неоднородность на микроуровне

№	Диагонали индентора, мкм		Нагрузка	Неоднородность, %	Отклонение от среднего
	d1	d2			
1	5,31	5,38	0,245N (25г)	1,32	5,88
2	4,38	5,44		24,20	17,00
3	5,68	5,44		4,23	2,97
4	4,94	5,19		5,06	2,14
5	5,00	5,06		1,20	6,00
Средняя неоднородность				7,20	
1	9,69	9,19	0,49N 50г	5,16	0,35
2	8,75	8,69		0,69	4,82
3	8,25	9,00		9,09	3,58
4	9,19	9,25		0,65	4,86
5	10,44	9,19		11,97	6,46
Средняя неоднородность				5,51	
1	17,50	14,25	0,98N (100г)	18,57	7,47
2	15,88	13,81		13,04	1,94
3	14,81	14,56		1,69	9,41
Средняя неоднородность				11,10	

Сопоставительным анализом полученных результатов (табл.3) в различных зонах покрытия ZrO_2 выявлена анизотропия свойств при нагрузке 0,245 N, которая связана с локальной неоднородностью в распределении компонентов (рис. 4). В то время как анизотропия при больших нагрузках может определяться значительным влиянием основного металла инструмента и диффузией углерода в переходном слое, приводящей к неравномерной деформации из-за формирования карбидов ZrC .

Рис.4. Микрорентгеноспектральный анализ покрытия ZrO_2

Локальные исследования микроструктуры покрытия ZrO_2 (рис. 4) иллюстрируют наличие в ней карбидных включений (табл.4) типа ZrC , что связано с наличием в поверхностном слое свободного углерода (графита), сформированного при деградации карбидной фазы, ее разрушении при эксплуатации изделия.

Таблица 4

Химический состав покрытия ZrO₂

Спектр	C	O	Zr	Итого
1	3.77	26.82	69.41	100.00
2	34.77	16.66	48.56	100.00
3	15.49	34.11	50.39	100.00
4	4.34	26.08	69.58	100.00

По данным различных исследователей [8-15] наличие углерода в керамических покрытиях с порами способствует изменению свойств. По одним данным – приводит к охрупчиванию, а по другим – повышает пластические свойства. Для установления влияния углерода, в конкретном случае при нанесении упрочняющего покрытия ZrO₂, оценивали по состоянию зон вокруг отпечатков инденторов при измерении микротвердости (нагрузка 0,98N). Анализом установлено, что вокруг отпечатка при таких нагрузках не выявляется каких-либо нарушений сплошности. Это свидетельствует о достаточной пластичности такого покрытия при диффузии углерода с подложки.

Для определения шероховатости поверхности покрытия и оценке влияния выявленных включений, использовали профилометр UIT TR200. В результате измерений выявлен разброс в показаниях в зонах изменения профиля. Среднее арифметическое отклонение профиля R_a колеблется в пределах от 0,079 до 0,479 мкм. Все параметры шероховатости поверхности при максимальном отклонении профиля представлены в табл.5.

Из анализа полученных данных следует, что покрытие ZrO₂ обеспечивает минимальную шероховатость поверхности с незначительным влиянием выявленных включений карбидов.

Таблица 5

Степень шероховатости упрочненной поверхности

Параметры шероховатости	Значение, мкм
Среднее арифметическое отклонение профиля R _a	0,479
Среднеквадратическое отклонение профиля R _q	0,605
Высота неровностей профиля по десяти точкам R _z	1,620
Общая высота неровностей R _t	3,880
Высота наибольшего выступа профиля R _p	0,564
Высота наибольшей впадины профиля R _v	1,036

Выводы

Для повышения износостойкости и долговечности инструмента из стали типа X12 нанесено упрочняющее покрытие ZrO₂. Оно было получено конденсацией вакуумно-дуговой плазмы очищенной от макрочастиц при помощи криволинейного фильтра на установке «Булат». Выполнены комплексные исследования стабильности свойств наноструктурного покрытия ZrO₂ на нано- и микроуровне. Получены данные нанотвердости упрочняющего покрытия ZrO₂, среднее значение составило 13,2 ГПа с минимальным разбросом результатов. Выявлена анизотропия свойств на микроуровне при нагрузке 25г. Установлено, что наличие дефектов в структуре инструмента оказывают существенное влияние на стабильность свойств керамического покрытия ZrO₂. Следует уделять особое внимание качеству упрочняемой поверхности материала, т.к. дефекты служат источником разрушения изделия.

Выполненные исследования показали, что нанесение многослойного наноструктурного покрытия общей толщиной 8,4 мкм, обеспечивает формирование довольно стабильных с разбросом неоднородности структуры менее 11,1%, а нано- и микротвердости до 4,75% и 14,43% соответственно. Такое структурообразование и свойства при используемых

предложенных параметрах технологического процесса обеспечат повышенную износостойкость в условиях эксплуатации.

Список использованных источников

1. Skoblo T.S., Romaniuk S.P., Sidashenko A.I., Garkusha I.E., Taran V.S., Taran A.V., Demchenko S.V. Study of degradation mechanism of metal-cutting tools and their hardening by ZrN PVD coatings, *Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics*, 2018, No.6, pp. 300-303.
2. <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/2195/doc/49951/>
3. Skoblo T.S., Romaniuk S.P., Sidashenko A.I., Garkusha I.E., Taran V.S., Nezovibat'ko Yu.N., Pilgii N.N. Development of complex technology of strengthening of thin-walled cutting tools, *Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics* (22), 2016, No. 6, pp. 286-290.
4. Romero R., Martin F., Ramos-Barrado J.R., Leinen D. Study of different inorganic oxide thin films as barrier coatings against the corrosion of galvanized steel, *Surface & Coatings Technology*, 2010, No. 204, pp. 2060–2063.
5. C.B. Carter, M.G. Norton. *Ceramic Materials: Science and Engineering*. Springer, 2007. P. 4-7.
6. Валюхов С.Г., Стогней О.В., Филатов М.С. Влияние условий магнетронного напыления на структуру жаростойких наноструктурированных покрытий из диоксида циркония ZrO₂, *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2015, № 11, С.97-105.
7. Taran A.V., Garkusha I.E., Taran V.S., Timoshenko O.I., Misiruk I.O., Skoblo T.S., Romaniuk S.P., Starikov V.V., Baturin A.A., Nikolaychuk G.P., Pyvovar N.V., Gnidenko Yu.P. Anti-corrosion ceramic coatings on the surface of Nd-Fe-B repelling magnets, *Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics*, 2019. No. 1, pp. 116-119.
8. Титов Н.В., Коломейченко А.В., Виноградов В.В., Басинюк В.Л. Особенности зажигания электрической дуги при карбовибродуговом упрочнении рабочих органов сельскохозяйственных машин. *Техника и оборудование для села*. 2016, № 4. С. 34-38.
9. Литовченко Н.Н., Куликов В.Н. Электродуговое упрочнение деталей нанесением металлокерамических покрытий. *Машино-технологическая станция*. 2011. №4. С. 50-51.
10. Титов Н.В., Коломейченко А.В. Восстановление и упрочнение стрелчатых лап почвообрабатывающих машин металлокерамическими материалами. *Тракторы и сельхозмашины*. 2014. №1. С. 42-43.
11. Коломейченко А.В., Титов Н.В., Виноградов В.В. Исследование микроструктуры композиционных металлокерамических покрытий, полученных карбовибродуговой наплавкой. *Сварочное производство*. 2016. № 11. С. 5-8.
12. Коломейченко А.В., Титов Н.В., Кондрахин Н.А. Исследование технологических возможностей карбовибродугового метода упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин. *Техника и оборудование для села*. 2015. №2. С. 24-26.
13. Ткачев В.Н. Работоспособность деталей машин в условиях абразивного изнашивания. М., 1995. - 336 с.
14. Способ упрочнения лезвий рабочих органов машин: пат. 2535123. Российская Федерация. №2013111230/02; опубл. 12.03.2013. Бюл. №34.
15. Способ восстановления лапы культиватора с одновременным упрочнением ее рабочей поверхности: пат. 2540316. Российская Федерация. № 2013131342/02; опубл. 08.07.2013. Бюл. № 4.

References

1. Skoblo T.S., Romaniuk S.P., Sidashenko A.I., Garkusha I.E., Taran V.S., Taran A.V., Demchenko S.V. Study of degradation mechanism of metal-cutting tools and their hardening by ZrN PVD coatings, *Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics*, 2018, No.6, pp. 300-303.
2. <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/2195/doc/49951/>
3. Skoblo T.S., Romaniuk S.P., Sidashenko A.I., Garkusha I.E., Taran V.S., Nezovibat'ko Yu.N., Pilgui N.N. Development of complex technology of strengthening of thin-walled cutting tools, *Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics (22)*, 2016, No. 6, pp. 286-290.
4. Romero R., Martin F., Ramos-Barrado J.R., Leinen D. Study of different inorganic oxide thin films as barrier coatings against the corrosion of galvanized steel, *Surface & Coatings Technology*, 2010, No. 204, pp. 2060–2063.
5. C.B. Carter, M.G. Norton. *Ceramic Materials: Science and Engineering*. Springer, 2007. P. 4-7.
6. Valjuhov S.G., Stognej O.V., Filatov M.S. Vliyanie uslovij magnetronnogo napylenija na strukturu zharostojkih nanostrukturirovannyh pokrytij iz dioksida cirkonija ZrO₂, *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie*. 2015. № 11. S.97-105. [in Russian].
7. Taran A.V., Garkusha I.E., Taran V.S., Timoshenko O.I., Misiruk I.O., Skoblo T.S., Romaniuk S.P., Starikov V.V., Baturin A.A., Nikolaychuk G.P., Pyvovar N.V., Gnidenko Yu.P. Anti-corrosion ceramic coatings on the surface of Nd-Fe-B repelling magnets, *Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics*, 2019. No. 1, pp. 116-119.
8. Titov N.V., Kolomeychenko A.V., Vinogradov V.V., Basinyuk V.L. (2016) Osobennosti zashchiganiya elektricheskoy dugi pri karbovibrodugovom uprochnenii rabochikh organov sel'skokhozyaystvennykh mashin. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. № 4. pp. 34-38. [in Russian].
9. Litovchenko N.N., Kulikov V.N. Elektrodugovoe uprochnenie detaley naneseniem metallokeramicheskikh pokrytij. *Mashinno-tekhnologicheskaya stantsiya*. 2011. №4. S. 50-51 [in Russian].
10. Titov N.V., Kolomeychenko A.V. Vosstanovlenie i uprochnenie strel'chatykh lap pochvoobrabatyvayushchikh mashin metallokeramicheskimi materialami. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2014. №1. S. 42-43. [in Russian].
11. Kolomeychenko A.V., Titov N.V., Vinogradov V.V. (2016) Issledovanie mikrostruktury kompozitsionnykh metallokeramicheskikh pokrytij, poluchennykh karbovibrodugovoy naplavkoy. *Svarochnoe proizvodstvo*. № 11. pp. 5-8. [in Russian].
12. Kolomeychenko A.V., Titov N.V., Kondrakhin N.A. (2015) Issledovanie tekhnologicheskikh vozmozhnostey karbovibrodugovogo metoda uprochneniya rabochikh organov pochvoobrabatyvayushchikh mashin. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. №2. pp. 24-26. [in Russian].
13. Tkachev V.N. (1995) Rabotosposobnost' detaley mashin v usloviyakh abrazivnogo iznashivaniya. M. [in Russian].
14. Sposob uprochneniya lezviy rabochikh organov mashin: pat. 2535123. Rossiyskaya Federatsiya. №2013111230/02; opubl. 12.03.2013. Byul. №34. [in Russian].
15. Sposob vosstanovleniya lapy kul'tivatora s odnovremennym uprochneniem ee rabochey poverkhnosti: pat. 2540316. Rossiyskaya Federatsiya. № 2013131342/02; opubl. 08.07.2013. Byul. № 4. [in Russian].