

УДК 621.901

Т.С. Скобло, проф., д-р техн. наук, С.П. Романюк, асп., А.И. Сидашенко, проф., канд. техн. наук

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени П.Василенко, г. Харьков, Украина, svetlana_sis_pro@list.ru

Разработка комплексного, эффективного способа упрочнения режущего инструмента для переработки сельхозпродукции

Для повышения эксплуатационной стойкости режущего инструмента в перерабатываемом производстве нанесено вакуумно – дуговым методом покрытие CrN толщиной 300÷900 нм. Предложен математический метод для качественного и количественного описания особенностей формируемой структуры покрытия. Новый способ обеспечивает повышение эксплуатационной стойкости тонкостенного режущего инструмента в 11 – 25 раз по сравнению с дисковыми ножами без упрочнения.

тонкостенный режущий инструмент, упрочнение нанопокрывтиями, нитриды, структура, свойства

Т.С. Скобло, проф., д-р техн. наук, С. П. Романюк, асп., О.І. Сідашенко, проф., канд. техн. наук

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені П.Василенка, м. Харків, Україна

Розробка комплексного, ефективного способу зміцнення ріжучого інструменту для переробки сільгосппродукції

Для підвищення експлуатаційної стійкості ріжучого інструменту в переробному виробництві нанесено вакуумно - дуговым методом покриття CrN товщиною 300 ÷ 900 нм. Запропоновано математичний метод для якісного і кількісного опису особливостей формованої структури покриття. Новий спосіб забезпечує підвищення експлуатаційної стійкості тонкостінного ріжучого інструменту в 11 - 25 разів у порівнянні з дисковими ножами без зміцнення.

тонкостінний ріжучий інструмент, зміцнення нанопокриттями, нітриди, структура, властивості

Постановка проблемы. При переработке сельхозпродукции используются различные виды режущего инструмента. В пищевой промышленности для измельчения широкого ассортимента продуктов, таких как сырая или соленая кожура цитрусовых, чернослива, изюма и, в частности, различных сортов орехов, используется режущий инструмент, изготовленный из холоднокатаной тонколистовой стали 65Г (отечественного производства) толщиной 0,64мм. Стойкость дисковых ножей недостаточна и составляет 1-2 дня.

Анализ последних исследований и публикаций. Для повышения потребительских свойств инструмента и его устойчивости в работе, эффективными решениями проблемы могут быть три направления: применение легированного материала; использование дополнительных конструктивных решений (создание элементов жесткости); применение упрочнения готовых ножей нанопокрывтиями [1,2]. Данная работа посвящена последнему направлению повышения стойкости инструмента.

Поэтому **целью работы** является повышение стойкости режущего инструмента за счет нанесения нанопокрывтия и анализ стабильности структурных составляющих при эксплуатации.

Изложение основного материала. Для повышения эксплуатационной стойкости ножей предложена технология упрочнения нанопокрытиями, нанесенных ионно – плазменным методом с использованием установки типа "Булат-6", разработанной в Институте физики плазмы ННЦ ХФТИ (г. Харьков) [3]. Для упрочнения дисковых ножей применяли нанопокрытие CrN. Для напыления покрытия в вакуумной камере было создано давление не ниже $P = 5 \cdot 10^{-5}$ Торр. Для лучшей адгезии покрытия CrN с режущим инструментом наносили подслои Cr (в течение 5 мин). Для получения нанопокрытия CrN вакуумную камеру заполняли азотом чистотой 99,99% до давления $P = 2 \cdot 10^{-3}$ Торр. Отрицательное смещение на подложке составило $U_{\text{смещ}} = - 80$ В. Параметры вакуумной дуги: ток дуги хромового катода – 110 А, $I_{\text{фок}} = 0,7$ А. Время нанесения нанопокрытий составляло 10-20 мин. В зависимости от времени обработки толщина полученного покрытия составляла от 300 нм до 900 нм. Упрочнение осуществляли с одной стороны для обеспечения при эксплуатации эффекта самозатачивания.

Предложенная технология включает предварительную обработку ультразвуком (в течение 5 мин) и ВЧ - разрядом перед нанесением покрытий. В процессе очистки режущего инструмента использовали следующие параметры разряда в среде аргона при давлении $P = 2 \cdot 10^{-1}$ Торр: отрицательное смещение на подложке составляло -1кВ, а время очистки – 15 мин.

Новый способ упрочнения тонкостенных дисковых ножей нанопокрытиями CrN защищен патентом Украины [4].

Для изучения влияния толщины покрытия на состав и распределение фаз сопоставительно анализировали образцы Cr+N толщиной 900нм и 300нм. Для описания процессов структурообразования упрочняющего покрытия использовали разработанную ранее методику [5], которая позволяет качественно и количественно определить фазовый состав и соотношение структурных составляющих, в том числе и формируемых в процессе нанесения покрытия. Специально разработанная программа включает 256 цветов (оттенков от черного до белого) от 0 до 255. При этом оптико - математической обработкой металлографических изображений статистически оценивали соотношения фаз в различных участках образцов до и после измерения микротвердости (по отпечатку), вокруг него и вне зоны измерения. Результаты оценки сведены в табл.1-3.

Таблица 1 – Распределение фаз при различной толщине покрытия

№ фото	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Примечание
1	5,9	0	0	0	6,4	43,1	0	0	0	13,3	21	0	0	0	0,7	9,6	покрытие CrN толщиной 900нм
2	20	0	0	0	13,6	21,9	0	0	0	9,6	18,4	0	0	0	1,8	14,7	
3	30,5	0	0	0	0	8,1	0	0	0	11	22	0	0	0	8,2	20,2	
4	6	0	0	0	2,4	41,7	0	0	0	14,5	23,4	0	0	0	0	12	
5	28,8	0	0	0	0,1	9	0	0	0	9,1	21,5	0	0	0	8,5	23	
6	32,3	0	0	0	0,7	9,1	0	0	0	6,6	19,8	0	0	0	7,9	23,6	
7	11,8	0	0	0	0,7	18,8	0	0	0	12	29,4	0	0	0	0	27,2	
8	35,9	0	0	0	0	5,7	0	0	0	6,6	19,9	0	0	0	8,1	24	
9	36,6	0	0	0	0,5	6,5	0	0	0	4,9	17,9	0	0	0	3,3	30,2	
10	28,5	0	0	0	1,1	9,2	0	0	0	6,5	22,1	0	0	0	2,5	30,2	покрытие CrN толщиной 300нм
11	24,3	0	0	0	0,8	22	0	0	0	9,6	21,1	0	0	0	2,8	19,4	
12	34,4	0	0	0	0,8	21	0	0	0	6,9	13,7	0	0	0	8,2	15	
13	12,5	0	0	0	1	13,8	0	0	0	11,4	32,6	0	0	0	0,4	28,3	

Из табл. 1 видно, что распределение формируемых фаз в покрытии различной толщины не зависит от его толщины и свидетельствует об однородности нанесенного слоя.

На рис.1 представлено качественное распределение структурных составляющих упрочняющего покрытия CrN на поверхности инструмента.

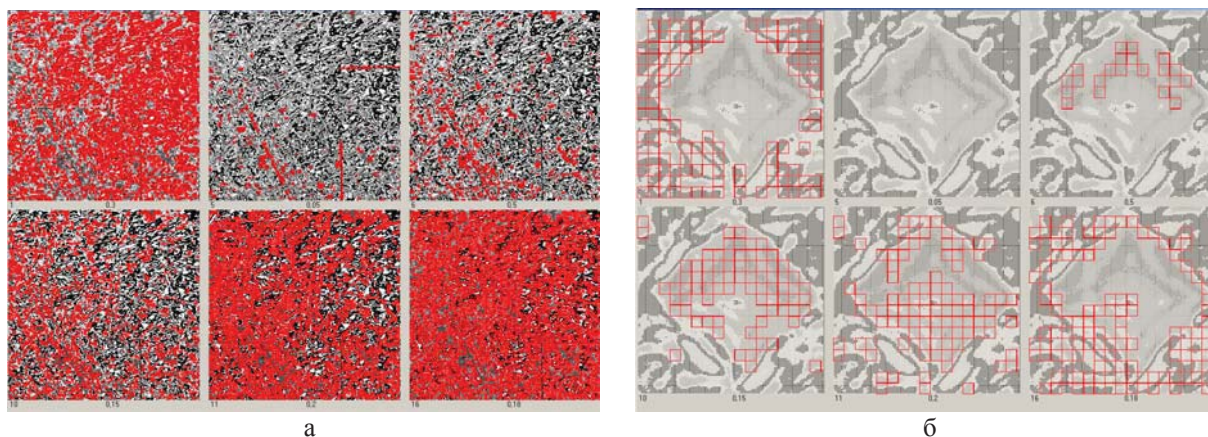


Рисунок 1 – Распределение структурных составляющих покрытия CrN по поверхности ножа (а) и под отпечатком индентора (б)

В системе железо-хром-азот образуются тройные твердые растворы внедрения структуры о.ц.к, г.ц.к. и г.п.у. Взаимодействие компонентов растворов, наносимых на сталь, приводит к образованию нитрида нестехиометрического состава $(Cr, Fe)N_{1-x}$. Предположительно, полученные структурные составляющие соответствуют следующим фазам: цвет 1 - чистый компонент Cr, цвет 5 – соединение FeN, цвет 6 – $(Fe,Cr)N$, цвет 10 – $(Me, Cr)N$. Упрочняющая фаза состоит, главным образом, из трех видов нитридов хрома с различной концентрацией азота: цвет 11 – $Cr_{1-x}N$, цвет 15 – CrN, цвет 16 – Cr_2N . Так как количество формируемых структур колеблется в довольно широких пределах (например, чистого компонента в покрытие CrN толщиной 900нм от 5,9 до 35,9%), то было сделано усреднение и полученные данные представлены в табл.2. Дальнейший сопоставительный анализ проводился только для выявленных фаз с цветом 1, 5, 6, 10, 11, 15, 16.

Таблица 2 – Средние значения распределение фаз при различной толщине покрытия

Cr	Fe_xN_y	$(Fe,Cr)N$	$(Me,Cr)N^*$	Cr_2N_x	Cr_2N	CrN	Примечание
21,4	2,99	19,68	10,34	21,93	4,40	19,29	покрытие CrN толщиной 900нм
27,26	0,84	14,5	7,86	21,48	3,44	24,62	покрытие CrN толщиной 300нм

*Примечание: в карбид типа $(Me,Cr)N$ помимо Fe может входить и Mn.

Наличие 45,62 – 49,54% нитридов на поверхности ножа с двухслойным нанопокрытием Cr - CrN обеспечивает повышение твердости, износостойкости и стабильность структуры, препятствуя пластической деформации режущего инструмента в эксплуатации.

Чем больше толщина слоя, тем выше температура и она способствует интенсификации диффузии железа и других компонентов из основного металла режущего инструмента по границам зерен с последующим формированием единичных сложных нитридов типа $(Me, Cr)N$. По данным табл. 2 видно, что в покрытии CrN толщиной 900нм, на 6,2% меньше чистого компонента (хрома), чем в слое 300нм.

Аналогичная картина и для нитридов с максимальной концентрацией азота. Их доля ниже на 5,33%. При этом по границам зерен формируются сложные соединения типа $(Fe, Cr)N$ и $(Me, Cr)N$. Их процентное соотношение на 2,15 и 5,17% выше в более толстом слое покрытия CrN. По зерну образуются нитриды различного состава: $Cr_{1-x}N$, CrN, Cr_2N . Степень однородности распределение каждой фазы в покрытии CrN представлено в табл. 3.

Таблица 3 – Степень однородности покрытия

Cr	Fe_xN_y	$(Fe,Cr)N$	$(Me,Cr)N$	Cr_2N_x	Cr_2N	CrN	Примечание
1,4-15,5	0,59-10,61	0,88-23,43	0,66-4,16	0,43-7,48	2,6-4,4	0,91-9,69	покрытие CrN(900нм)
1,24-12,5	0,04 - 1,0	5,3-13,8	0,96-11,4	0,38-32,6	0,14-4,76	5,22-28,3	покрытие CrN(300нм)

Из анализа полученных в табл. 3 данных следует, что максимальная степень неоднородности характерна для FeN в покрытии толщиной 900нм. При этом наиболее стабильной и однородной выявилась нитридная составляющая $Cr_{1-x}N$.

Диффузия Cr и N при нанесении покрытия характеризует фазовый состав в подповерхностном слое, глубиной проникновения индентора (табл. 4).

Таблица 4 – Вклад температуры в диффузию хрома и азота при нанесении покрытия

Процентное содержание фаз							Примечание
Cr	Fe_xN_y	$(Fe,Cr)N$	$(Me,Cr)N$	Cr_2N_x	Cr_2N	CrN	
18,24	4,50	24,76	11,50	21,26	3,84	15,90	отпечаток в покрытии CrN (900нм)
29,35	0,80	21,50	8,25	17,40	5,50	17,20	отпечаток в покрытии CrN (300нм)
26,67	0,47	11,20	8,40	23,03	5,33	24,93	покрытие CrN (900нм)
25,87	0,87	9,83	7,60	24,20	2,07	29,57	покрытие CrN (300нм)

В различные периоды оценки толщины покрытия в деформационных полосах при индентировании может происходить перемещение отличающихся типов упрочняющих фаз.

Сопоставляя процентное содержание фаз в отпечатке (см. табл. 4) и по поверхности режущего инструмента с покрытием CrN, следует отметить, что на глубину внедрения индентора, максимально уменьшилась концентрация нитрида Cr_2N - на 9,03% (для толщины 900 нм) и на 12,37% (для 300 нм). Содержание чистого компонента понизилось на 8,43% в покрытии толщиной 900нм. При этом увеличилась его доля на 3,48% в покрытии 300 нм. Основной вклад температуры заключается в диффузии азота, приведшей к формированию нитридов FeN, концентрация которых в 9,57 раз выше в отпечатке, чем в покрытии толщиной 900нм, где их доля минимальна (0,47), и к диффузии хрома в покрытии толщиной 300нм, концентрация которого на 3,48% выше в отпечатке, чем в поверхностном слое.

Из сопоставительного анализа результатов оптико – математической обработкой металлографических изображений можно сделать вывод, что распределение формируемых фаз в покрытии различной толщины не зависит от его глубины и свидетельствует об однородности нанесенного слоя. Повышенная температура способствует интенсификации диффузии железа и других компонентов из основного металла режущего инструмента по границам зерен с последующим формированием единичных сложных нитридов. Также отмечается диффузия азота и хрома в подповерхностный слой.

Проведен анализ упрочненных ножей с разной толщиной нанопокрyтия CrN после эксплуатации (табл. 5).

Сопоставительный анализ полученных усредненных данных по количеству фаз до (см. табл. 2) и после эксплуатации (см. табл. 5) показал, что происходит разрушение сложных нитридов с железом (Fe,Cr)N с формированием более устойчивой структурной составляющей Cr₂N, особенно это характерно для покрытия CrN с толщиной 900 нм. Увеличение концентрации чистого компонента на 34,3% (300 нм) и 44,9% (900 нм) характеризует износ нитридного слоя с проявлением подслоя Cr, который не обеспечивает необходимой стойкости. Это и приводит к разрушению инструмента.

Таблица 5 – Средние значения распределение фаз после эксплуатации

Cr	Fe _x N _y	(Fe,Cr)N	(Me,Cr)N	Cr ₂ N _x	Cr ₂ N	CrN	Характеристика покрытия после эксплуатации
31,0	01,9	09,5	05,9	19,3	03,0	29,4	CrN (900нм)
36,6	02,1	09,4	05,4	15,0	06,1	25,3	CrN (300нм) (рис.2, зона 1)
28,0	02,2	13,7	07,6	21,2	02,4	24,9	CrN (300нм) (рис.2, зона 2)



Рисунок 2 – Поверхность дискового ножа с нанопокрyтием CrN (300нм) после эксплуатации 1, 2 зоны измерения

В результате нанесения упрочняющего нанопокрyтия CrN, обеспечено повышение износостойкости режущей кромки дискового ножа и эффект самозатачивания при эксплуатации, уменьшение склонности к усталостной повреждаемости.

Эксплуатационные испытания упрочненных тонкостенных ножей с покрытием 300-900 нм по предложенной технологии, проведенные на ПАО «Кондитерская фабрика «Харьковчанка» показали, что их стойкость в 11 - 25 раз выше исходного инструмента.

Выводы. Разработан новый комплексный технологический процесс упрочнения тонкостенных ножей нанопокрyтием состава Cr+CrN, нанесенного вакуумно – дуговым методом в присутствии ВЧ разряда. Данный процесс включает и предварительную обработку перед нанесением покрытий для активации поверхности, ее очистку.

Для получения качественной и количественной информации о структурных составляющих, состоянии покрытия и его износе, использована оптико-математическая обработка изображений. Исследованы структуры покрытия и определено процентное содержание его фазового состава. Упрочняющая фаза в покрытии CrN толщиной 300нм и 900нм состоит, главным образом, из трех видов нитридов хрома с различной концентрацией азота: Cr_{1-x}N (21,93 -21,48%), CrN (4,40-3,44%), Cr₂N (19,29 - 24,62%). При этом чистого компонента Cr в нанопокрyтии 21,4 - 27,26%. При нанесении покрытия отмечается диффузия железа по границам зерен с формированием фаз Fe_xN_y и (Fe,Cr)N. Установлено, что эксплуатационную стойкость инструменту обеспечивают

нитридные составляющие покрытия. Их частичный износ приводит к разрушению дисковых ножей.

Предложенная технология упрочнения тонкостенного режущего инструмента нанопокрыванием CrN для условий промышленного производства ПАО «Кондитерская фабрика «Харьковчанка» позволила продлить срок службы изделий на 11 (толщиной 300 нм) и 25 дней (900 нм).

Список литературы

1. Анализ методов упрочнения режущих инструментов [Текст] /С.П. Романюк // Вісник ХНТУСГ, Випуск 133. – Харків, 2013. – С. 136 - 142.
2. Анализ патентов и авторских свидетельств по упрочнению изделий [Текст] /С.П. Романюк // Вісник ХНТУСГ. – Харків, 2015.- Випуск 158. – С. 117-126.
3. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия [Текст] / А.А. Андреев, В.П. Саблев, В.М. Шулаев, С.Н.Григорьев – Харьков: «ННЦ «ХФТИ»», 2005. – 235с.
4. Пат. UA № 98218 МПК C23C 14/00; Спосіб нанесення нанозміцнюючого покриття для тонкостінних дискових ножів [Текст] / С.П. Романюк; заявник і патентовласник; Романюк С.П. – № u201410769 - Заявлено 02.10.2014; опубл. 27.04.2015. - Бюл.№ 8.
5. Методика математической оценки фазового состава стали [Текст] / Т. С.Скобло, Е.Л.Белкин, С.П. Романюк // Вісник ХНТУСГ. – Харків, 2014. – Випуск 146. – С.8-24.

Tamara Skoblo, Prof., DSc., Svitlana Romaniuk, post-graduate, Aleksandr Sidashenko, Prof., PhD tech. sci.
Kharkiv Petro Vasylenko national technical university of agriculture, Kharkiv, Ukraine

Development of complex, efficient method of hardening of cutting tools for the processing of agricultural products

The purpose of the work is improving the operational stability of the thin-walled cutting tools by applying of nano-coatings and the analysis of stability of structural components during its operation.

To improve the operational stability of the disk cutting tool in the processing industries, made of cold-rolled thin-sheet steel 65G, the CrN coating of 300÷900nm thickness has been applied. It was obtained by the vacuum - arc method at recommended processing parameters. Optical - mathematical methods have been proposed for the qualitative and quantitative description of the features of the formed coating structure at different layer thickness. Features of the phases distribution in the nanocoating has been studied and its influence on operational stability of the tool has been estimated.

The proposed method of hardening by the CrN nanocoatings provides increasing of wear and corrosion resistance. Industrial tests of hardened knives has showed the increasing of operational stability of the thin-walled cutting tools in 11-25 times in comparison with disc knives without hardening.

thin-walled cutting tools, hardening by nanocoatings, structure, properties

Одержано 04.11.15