

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА НЕОДНОРОДНОСТИ СТРУКТУРЫ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА, УПРОЧНЕННОГО ПОКРЫТИЕМ CrN

Скобло Т. С., Романюк С. П., Сидашенко А. И., Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко

Аннотация. Проведены исследования степени структурной неоднородности покрытия CrN при помощи оптико-математического метода. Выполнен сопоставительный анализ особенностей структурообразования упрочненной поверхности инструмента с исходным состоянием ножа. Предложенным методом описания формирования отпечатков при наноиנדентировании покрытий оценен характер деформации упрочненного слоя, который является важным при оценке поведения покрытия в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: нитрид хрома, структурная неоднородность, покрытие, изображение, дефекты.

Введение

Неотъемлемой частью многих технологий в кондитерском и перерабатывающем производстве является процесс измельчения сырья животного и растительного происхождения. Потребительские свойства выпускаемых изделий непосредственно зависят от качества переработанных продуктов, что определяется эксплуатационной стойкостью элементов оборудования.

Анализ публикаций

Измельчение орехов осуществляется стальными дисковыми ножами, долговечность которых недостаточна и составляет 1–2 смены. Для повышения эксплуатационной стойкости режущего инструмента в перерабатывающем производстве была предложена и запатентована технология упрочнения ножей [1]. На установке «Булат» нанесено вакуумно-дуговым методом покрытие CrN толщиной 300–900 нм. Разработан комплексный эффективный способ, включающий предварительную обработку и циклическое нанесение нанослоя для упрочнения ножей покрытием CrN для условий промышленного производства ПАО «Кондитерская фабрика «Харьковчанка»». Это позволило продлить срок службы изделий в 11 (при толщине покрытия 300 нм) и 25 раз (при 900 нм), по сравнению с исходными. Дальнейшие исследования были направлены на увеличение толщины упрочненного слоя до 3 мкм [2], а также выявление оптимального сочетания свойств нанесенного покрытия.

Для разработки параметров технологических процессов упрочнения ножей с повышенной эксплуатационной стойкостью и их прогнозирования необходим детальный анализ формируемых структур нанесенного слоя с использованием комплексных методик, включающих растровую электронную микроскопию [3], микрорентгеноспектральный анализ и измерения нанотвердости [4].

Цель и задачи исследования

Целью работы является использование нового математического подхода для оценки степени неоднородности различных структурных составляющих упрочненного покрытием CrN поверхности режущего инструмента, работающего в условиях локального воздействия абразивных частиц.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи: разработать параметры технологии нанесения покрытий, которые уменьшат диффузию компонентов подложки в покрытие, обеспечат стабильность структуры и повысят стойкость инструмента.

Методы и результаты исследования

В работе исследуются изображения микроструктур упрочненного покрытием CrN поверхности режущего инструмента, полученные на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6390LV при ускоряющих напряжениях 10kV и при наноиנדентировании.

При обработке изображения рассматривали равномерную прямоугольную сетку точек

(пикселей) размерами 3×3, 4×4 и 5×5, на которой заданы значения функций. В данном случае это цвета или оттенки этих точек. Пример схемы расположения точек вокруг средней c_1 показан на рис. 1. Степень неоднородности в каждой вычисляли как соотношение данного показателя относительно 9, 16 или 25 точек соответственно.

$$\begin{array}{c} c_3 \cdot c_4 \cdot c_5 \cdot \\ c_2 \cdot c_1 \cdot c_6 \cdot \\ c_9 \cdot c_8 \cdot c_7 \cdot \end{array}$$

Рис. 1. Схема нумерации точек вокруг – средней по схеме 3×3

Построены гистограммы распределения цветов, полученных с помощью специально разработанной программы, которая включает 256 цветов (оттенков от черного до белого) от 0 до 255. Они поделены на 16 интервалов, описывающих 3 группы фаз: 1 – чистый компонент основы покрытия, 5–10 – нестабильные соединения с Fe и C (основа), а также Cr, 11–16 – нитриды. Результаты показали среднее количество выявленных фаз по площади исследуемых фотографий.

В табл. 1 представлены полученные данные для режущего инструмента, упрочненного покрытием CrN толщиной 3 мкм. Анализировали сопоставительно изображения 1–7, полученные с электронного микроскопа, 8–9 – при наноиндентировании; при этом фото 1–8 относятся к покрытию CrN толщиной 3 мкм, а 9 – 900 нм. Из полученных данных следует, что в разных зонах упрочненной поверхности концентрация фаз существенно отличается. Кроме того, выявлено большое количество нестабильных соединений.

Проведенный сравнительный анализ [5] степени неоднородности различных структурных составляющих исходного металла

режущего инструмента (при помощи оптикоматематического метода) выявил дефекты кристаллического строения и позволил определить степень неоднородности по концентрации компонентов внутри каждой фазы.

Установлено, что в новом инструменте высокий уровень неоднородности по всей анализируемой поверхности свидетельствует о некачественно проведенной термообработке, а также определяется заточкой ножа. В процессе эксплуатации в структуре ножа, в областях, склонных к усталостному разрушению (середина и основание), формируются зоны повреждаемости (пустоты и поры) с максимальной степенью неоднородности фаз, что влияет на надежность и срок службы инструмента в результате создания локальных напряженных участков. Установлено, что максимальная степень однородности для исходных ножей по схеме 3×3 анализа не превышает 0,55. При этом для упрочненного инструмента этот показатель составляет 0,81 (табл. 2). Чем ближе этот показатель к единице, тем более формируется однородная структура. Также проведены исследования изображений структуры металла упрочняющих покрытий по схемам 4×4 и 5×5 пикселей. Получены данные по средней степени неоднородности на заданных фрагментах анализируемых изображений, а также по всему фото (табл. 2). Из полученных данных следует, что чем больше площадь анализируемой области изображения, тем меньше структурная неоднородность.

Поэтому анализ изображений по схеме 5×5 пикселей больше подходит для оценки грубой, крупнозернистой структуры. Для мелкодисперсной же – оптимальный анализ следует производить по схеме 3×3 пикселя, так как позволяет выявить локально большее количество дефектов структуры.

Таблица 1 – Гистограммы распределения цвета для режущего инструмента, упрочненного покрытием CrN

Номера цветов																№ фото
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
7,1	2,2	1,2	1,5	3,5	9,5	26,2	39,9	7,3	0,6	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	1
0,0	0,0	0,0	0,1	0,5	4,3	30,2	51,0	11,3	1,4	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	2
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	8,1	27,7	47,1	11,6	3,2	0,3	0,4	0,2	0,1	0,8	3
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	7,5	25,7	47,0	16,1	0,9	1,0	0,3	0,2	1,0	4
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	12,4	33,0	45,6	03,6	2,9	0,5	0,1	0,8	5
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	11,7	28,0	37,5	13,6	05,5	0,3	0,3	0,1	0,0	0,7	6
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,6	59,6	31,4	1,2	1,1	0,2	0,0	0,8	7
1,6	0,0	0,0	0,0	1,5	28,6	0,0	0,0	0,0	17,2	30,3	0,0	0,0	0,1	03,8	16,9	8
13,5	0,0	0,0	0,0	0,4	16,1	0,0	0,0	0,0	10,7	25,9	0,0	0,0	0,1	11,1	22,1	9

Таблица 2 – Гистограммы неоднородности

Средняя неоднородность по схемам				№ фото
3×3 пикселя	4×4 пикселя	5×5 пикселей	по всему фото	
0,702	0,665	0,641	0,249	1
0,733	0,693	0,665	0,366	2
0,814	0,784	0,761	0,32	3
0,804	0,771	0,745	0,319	4
0,683	0,639	0,61	0,335	5
0,779	0,753	0,734	0,255	6
0,78	0,757	0,743	0,457	7
0,819	0,773	0,741	0,234	8
0,809	0,762	0,728	0,184	9

В методике математической обработки изображений [6] были введены такие понятия:

– абсолютное значение дивергенции, описывающее плотность фрагмента изображения. Чем больше значение дивергенции, тем больше структурных изменений происходит в покрытии;

– абсолютное значение лапласиана, опи-

сывающего диффузию химических компонентов;

– обобщенный градиент, который является средней эффективной скоростью изменения цвета, что соответствует интенсивности возникающих деформаций.

Полученные результаты значения функций представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Значения средних исследованных функций

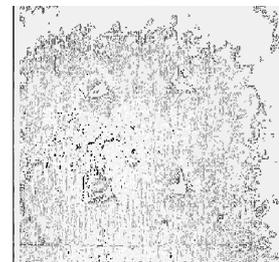
Цвет	Среднекв. отклонение цвета	Обобщенный градиент	Лапласиан	3-й лапласиан	4-й лапласиан	Дивергенция	№ фото
99,4	14,1	11,5	40,1	70,4	135,1	21,8	1
115,8	12,0	9,9	33,6	59,3	113,1	18,6	2
133,2	11,0	8,9	30,9	54,5	104,3	17,0	3
150,8	12,7	10,3	34,5	61,5	116,6	19,3	4
162,3	11,4	9,6	32,5	57,5	109,9	17,8	5
131,7	15,4	12,5	41,2	72,1	135,5	23,5	6
159,3	9,2	7,8	27,6	48,7	94,2	14,8	7

Проведя сопоставительный анализ полученных данных с проведенными ранее исследованиями [7], установили, что все анализируемые функции в 2–4 раза ниже в упрочненном инструменте по сравнению с исходным состоянием. Циклическое нанесение покрытий [2] препятствует диффузии химических элементов, что подтверждается проведенными расчетами, показавшими существенное уменьшение абсолютного значения лапласиана.

Для измерения свойств покрытий использовали специальные методы наноиндентирования на приборе «Nanoindenter G200». Оценивали твердость и модуль упругости нанесенных упрочняющих покрытий, а также их стойкость к упругой деформации разрушения и сопротивление материала пластической деформации. Полученные изображения отпечатков от пирамиды Берковича (рис. 2, а) сопоставительно анализировали с помощью разработанной ранее методики [8].



а



б

Рис. 2. Характер изображения отпечатков индентора на упрочненной поверхности инструмента покрытием CrN; а – исходное изображение, б – формируемый рельеф индентирования после математической обработки

Анализ изменения металлографических изображений вокруг пирамидальных отпечатков служит источником информации о свойствах исследуемой упрочненной покрытием поверхности режущего инструмента, а также о способности материала ножа сопротивляться деформации.

В результате анализа установлено, что при наноиндентировании покрытия CrN толщиной 3 мкм (вдавливание индентора на глубину 200 нм) зоны пластической деформации не формируются. При увеличении нагрузки и проникновении индентора на всю глубину слоя появляются незначительные искажения на гранях отпечатка (рис. 2). Результаты исследований коррелируют с полученными при наноиндентировании данными модуля упругости, который составляет в первом случае 309,4 ГПа, а во втором – 303,6 ГПа.

Выводы

Оптико-математическим методом проведен сравнительный анализ степени неоднородности упрочненной покрытием CrN поверхности инструмента в зависимости от анализируемой области и параметров обработки. Данный метод позволил выявить неоднородность по концентрации компонентов на изображениях структуры покрытия, полученных на электронном микроскопе. Установлено, что циклическое нанесение покрытий на поверхность инструмента препятствует диффузии химических элементов из основы ножа, уменьшает структурные изменения в 2–4 раза по сравнению с исходным состоянием.

С помощью метода математического описания деформационных зон поверхностных слоев металла покрытия проведен анализ упругопластических свойств поверхностного слоя. Показано, что на наноуровне в покрытии CrN зоны пластической деформации не выявлены.

Литература

1. Патент № 98218 України, МПК (2015.01) C23C 14/00, C23C 28/02 (2006.01). Спосіб нанесення нанозмцнюючого покриття для тонкостінних дискових ножів / Т.С. Скобло, С.П. Романюк, та ін.; заявник та патентовласник С.П. Романюк. – № u201410769. заявл. 02.10.2014.; опубл. 27.04.15., Бюл. №8.
2. Патент № 100201 Україна, МПК (2015.01) C23C 14/00. Спосіб нанесення багатоша-

рових нанопокриттів / Скобло Т.С., Романюк С.П., Сідашенко О.І., Гаркуша І.Є., Таран В.С., Незовибатько Ю.М.; заявник та патентовласник Романюк С.П. – №u201501556. заявл. 23.02.2015.; опубл. 10.07.15., Бюл. № 13.

3. Векилова Г.В. Дифракционные и микроскопические методы и приборы для анализа наночастиц и наноматериалов: учебное пособие / Г.В. Векилова, А.Н. Иванов, Ю.Д. Ягодкин. – М.: МИСиС, 2009. – 144 с.
4. Oliver W., Pharr G. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology / W. Oliver, G. Pharr // J. Mater. Res. – 2004. – Vol. 19, № 1. – P. 3–20.
5. Применение оптико-математического метода для описания неоднородности структуры режущего инструмента / Т.С. Скобло, С.П. Романюк, А.И. Сидашенко и др. // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – 2017. – №8. – С. 159–166.
6. Скобло Т.С. Методика математической оценки фазового состава стали / Т.С. Скобло, Е.Л. Белкин, С.П. Романюк // Вісник ХНТУСГ: Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві. – 2014. – Вип. 146. – С. 8–24.
7. Математическая оценка структурообразования при эксплуатации ножей, используемых в кондитерском производстве / Т.С. Скобло, С.П. Романюк, А.И. Сидашенко, Е.Л. Белкин // Современные проблемы освоения новой техники, технологии, организации технического сервиса в АПК: – 2014. – № 41. – С. 225–234.
8. Романюк С.П. Методика определения характера деформации и степени упрочнения поверхности нанопокритием / Т.С. Скобло, С.П. Романюк, Е.Л. Белкин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2015. – №9, Том 81. – С. 71–74.

References

1. Romaniuk, S.P. (2015). Sposib nanesennia nanozmitsnuiuchoho pokryttia dlia tonkostinnykh dyskovykh nozhiv [Method of applying a nano-strengthening coating for thin-walled disk knives]. Patent №98218 Ukraine [in Ukrainian].

2. Romaniuk, S.P. (2015). Sposib nanesennia bahatosharovykh nanopokryttiv [Method of applying multilayer nanocoatings]. Patent №100201 Ukraina [in Ukrainian].
3. Vekilova, G.V., Ivanov, A.N., Yagodkin, Yu.D. (2009). Difraktsionnyie i mikroskopicheskie metody i pribory dlya analiza nanochastits i nanomaterialov. [Diffraction and microscopic methods and instruments for the analysis of nanoparticles and nanomaterials]. Moscow: MISiS [in Russian].
4. Oliver, W., Pharr, G. (2004). Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. *J. Mater. Res.* 19, 1, 3-20.
5. Skoblo, T.S., Romaniuk, S.P., Sidashenko A.I. (2017). Primenenie optiko-matematicheskogo metoda dlya opisaniya neodnorodnosti struktury rezhushchego instrumenta [Application of the optical-mathematical method for inhomogeneity description of the cutting tool structure]. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv - Technical service of agroindustrial, forestry and transport complexes*, 8, 159-166 [in Russian].
6. Belkin, E.L., Romaniuk, S.P. (2014). Metodika matematicheskoy otsenki fazovogo sostava stali [Technique of mathematical estimation of the steel phase composition]. *Visnyk KhNTUSH - Bulletin KhPVNTUA*, 146, 8-24 [in Russian].
7. Matematicheskaya otsenka strukturoobrazovaniya pri ekspluatatsii nozhey, ispolzuemyih v konditerskom proizvodstve [Mathematical estimation of structure formation at operation of knives used in the confectionery industry]. *Sovremennyye problemy osvoeniya novoy tehniki, tehnologii, organizatsii tehnikeskogo servisa v APK - Modern problems of development of new equipment, technology, organization of technical service in the agro-industrial complex*, 41, 225-234 [in Russian].
8. Romanyuk, S.P. Metodika opredeleniya haraktera deformatsii i stepeni uprochneniya poverhnosti s nanopokrytiem [Technique of determining the character of deformation and degree of hardening of the nanocoating]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov - Factory laboratory. Diagnostics of materials*, 9, 81, 71-74 [in Russian].

Скобло Тамара Семеновна, д.т.н., проф.,
кафедра технологических систем
ремонтного производства,
Романюк Светлана Павловна, к.т.н.,
кафедра технологии материалов,
Сидашенко Александр Иванович, к.т.н.,
проф., кафедра технологических систем
ремонтного производства,
Харьковский национальный технический
университет сельского хозяйства имени
Петра Василенко,
61002, Украина, г. Харьков, ул. Алчев-
ских, 44, тел.: +38 057-716-41-53,
e-mail: Techmat@ukr.net

**MATHEMATICAL ESTIMATION
OF INHOMOGENEITY OF THE CUTTING
TOOL STRUCTURE STRENGTHENED WITH
CrN COATING**

**Skoblo T., Romaniuk S.,
Sidashenko A., Kharkiv Petro Vasylenko
National Technical University of Agriculture**

Abstract. Problem. Nuts grinding in the processing industry is produced with steel disk knives which have an insufficient durability of 1-2 turns. In order to increase the cutting tool operational stability, the hardening implementation is reasonable. The conducted industrial tests show that the service life of the tool reinforced by different methods differs. Among the reasons for the different operational resistance there are structural heterogeneity and nonequilibrium state of the phases of the deposited film coatings. **Goal** of our study consists in application of a new mathematical approach to estimate the heterogeneity degree of various structural components of a hardened cutting tool CrN surface operating under the local influence of abrasive particles. **Methodology.** An estimation of the degree of the hardening coatings structural heterogeneity is carried out with an optical-mathematical method. **Results.** A comparative analysis of features of the hardened tool surface structure formation with the initial state of the knife is performed. The proposed method makes it possible to establish that the degree of structural heterogeneity is 47 % lower for a tool with 3 μm thick CrN coating. **Originality.** Influence of the technology of tool hardening on tools' structure formation is determined. It is shown that cyclic coating of the tool surface prevents the diffusion of chemical elements from the base of the knife and reduces structural changes as compared to the initial state. The proposed method for describing the prints formation in the nanoindentification of coatings allows one to estimate the behavior of the hardened layer deformation, which is important in understanding the performance of coating during operation. **Practical value.** A detailed analysis of the structures formed in the deposited layer made via the optical-

mathematical method makes it possible to predict the development of the damageability of a hardened tool with different thicknesses of CrN coating.

Key words: chromium nitride, structural heterogeneity, coating, defects, image.

**МАТЕМАТИЧНА ОЦІНКА
НЕОДНОРІДНОСТІ СТРУКТУРИ
РІЖУЧОГО ІНСТРУМЕНТА, ЗМІЦНЕНОГО
ПОКРИТТЯМ CRN**

**Скобло Т. С., Романюк С. П., Сідашенко О. І.,
Харківський національний технічний
університет сільського господарства
імені Петра Василенка**

Анотація. Подрібнення горіхів у переробному виробництві здійснюється сталевими дисковими ножами, довговічність яких є недостатньою і становить 1–2 зміни. Для підвищення експлуатаційної стійкості ріжучого інструмента доцільно проводити зміцнення. Промислові випробування показали, що термін служби зміцненого різними способами інструмента відрізняється. Одним з факторів відмінної експлуатаційної стійкості є структурна неоднорідність і нерівноважний стан фаз нанесених плівкових покриттів. Використання нового математичного підходу для оцінки ступеня неоднорідності різних структурних складових зміцненої покриттям CrN поверхні

ріжучого інструмента, що працює в умовах локального впливу абразивних частинок. Оцінку ступеня структурної неоднорідності зміцнювальних покриттів проводили з використанням розробленого оптико-математичного методу. Виконано порівняльний аналіз особливостей структуроутворення зміцненої поверхні інструмента з вихідним станом ножа. Запропоновано новий метод циклічного нанесення покриття, який дозволив встановити, що ступінь структурної неоднорідності на 47 % нижче в інструмента з покриттям CrN (товщиною 3 мкм). Визначено вплив технології зміцнення інструмента на його структуроутворення. Встановлено, що циклічне нанесення покриттів на поверхню ножа перешкоджає дифузії хімічних елементів з основи, зменшує схильність до структурних змін при експлуатації порівняно з вихідним станом. Методом опису структуроформування навколо відбитків при наноіндентуванні покриттів оцінено характер деформації циклічно зміцненого шару, який є важливим при оцінюванні поведінки покриття у процесі експлуатації. Детальний аналіз сформованих структур нанесеного шару з використанням оптико-математичного методу дозволяє прогнозувати зміну фазових складових та розвиток пошкоджуваності зміцненого інструмента з різною товщиною покриття CrN.

Ключові слова: нітрид хрому, структурна неоднорідність, покриття, дефекти, зображення.