

**Скобло Т. С.,  
Романюк С. П.,  
Белкин Е.Л.**

Харьковский национальный техниче-  
ский университет сельского хозяйства  
имени П.Василенко,  
г. Харьков, Украина  
**E-mail:** tservis@ticom.kharkov.ua

## ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛЕРОДА В ТОНКОСТЕННОМ РЕЖУЩЕМ ИНСТРУМЕНТЕ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

*УДК 621.901*

С помощью математических методов проведен сравнительный анализ перераспределения углерода в ножах, используемых в кондитерском производстве, на основе изображений микроструктур и данных микрорентгеноспектрального анализа. Исследованы особенности перераспределение углерода в карбидах сталей 65Г и 20Х13 в процессе эксплуатации. Предложена модель процесса диффузии углерода в различных зонах ножей.

**Ключевые слова:** Сталь, режущий инструмент, структура, углерод, математический метод, фазовый состав

### **Актуальность проблемы**

Функциональное назначение режущего инструмента, используемого в кондитерском производстве для дробления орехов – сохранять свою работоспособность в течение заданного периода эксплуатации. Потеря работоспособности в период запланированного времени эксплуатации приводит к негативным последствиям процесса резания, особенно, в условиях автоматизированной обработки.

Срок эксплуатации режущего инструмента непосредственно зависит от материала, из которого изготовлены ножи, стабильности структурных его составляющих в условиях циклического деформационного воздействия.

В процессе эксплуатации ножей из сталей 65Г и 20Х13 [1] происходит деформирование структуры их металла и углерод перераспределяется по всем структурным составляющим (аустенит, феррит и карбиды). При этом, основная доля связана с его перераспределением в виде углеродосодержащих составляющих на деформированных участках. Пластическая деформация инициирует нестабильное состояние цементита, его повреждаемость и частичный распад [2].

Целью работы является исследование перераспределения углерода в процессе эксплуатации в различных областях режущего инструмента, изготовленного из сталей 65Г и 20Х13, с разной степенью деформации.

В задачи исследования входило: разработка метода и проведения оценки особенностей структурных изменений и количественного описания процессов, происходящих в различных зонах ножей при эксплуатации.

### **Материалы и результаты исследования**

В работе исследовали дисковые ножи, изготовленные из холоднокатаной тонколистовой конструкционной 65Г и нержавеющей 20Х13 сталей, которые используются в кондитерском производстве при дроблении орехов. Анализировали новый режущий инструмент и после его эксплуатации.

Диффузия углерода в стали 65Г начинается еще на начальных этапах производства проката и подготовки ножа к эксплуатации. Так как исследуемый нож изготовлен

из холоднокатаной стали, то уже в процессе прокатки часть углерода выдавливается на поверхность листа (рис.1), формируя фазы карбидного типа. При этом зоны, прилегающие к поверхности, несколько обеднены углеродом.

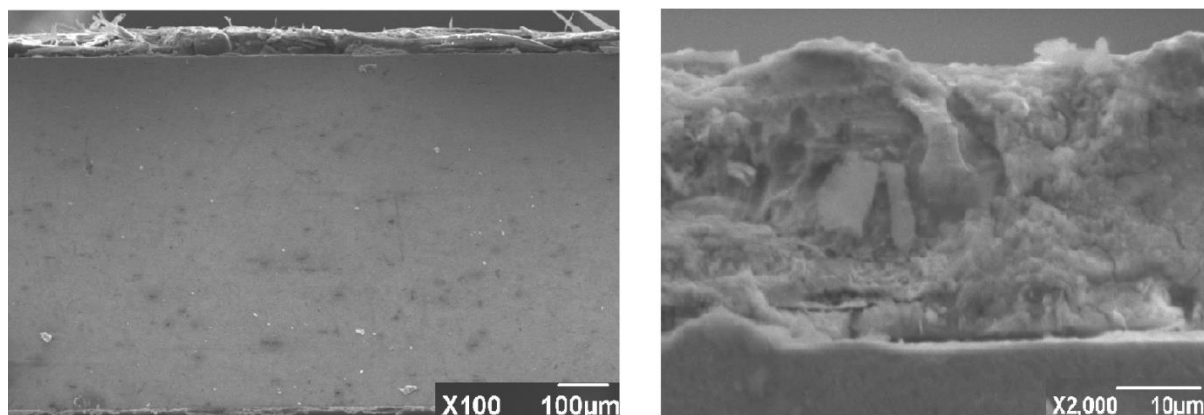


Рис. 1. Поверхность нового ножа из стали 65Г при увеличении x100 и x2000

Одновременно при изготовлении ножа формируют лезвие путем заточки, что также способствует изменению структуры этой зоны.

В процессе эксплуатации наблюдается неоднородная диффузия атомов углерода в ножах как стали 20X13, так и 65Г.

При внешнем воздействии в лезвии ножа из стали 65Г происходит обезуглероживание его поверхности. Этот деформационный слой теряет упругие свойства и представляет собой пластичную ферритную структуру, которая легко деформируется (кромка заворачивается) в процессе эксплуатации. Химический состав этого слоя лезвия, оцененный методом энергодисперсионной спектроскопии, отличается от исходного состава и не содержит углерод.

В зоне, следующей за кромкой лезвия с обезуглероженной структурой, выявляются темные и светлые участки с неравномерным распределением углерода. Такие зоны расположены под углом  $45^{\circ}$ . Это полосы скольжения и они представляют собой чередующиеся включения карбидной фазы и феррита.

Неравномерное распределение углерода отмечается и по всему лезвию (рис. 2, а). Происходит это за счет диффузии углерода в более деформированные области (диффузия под напряжением).

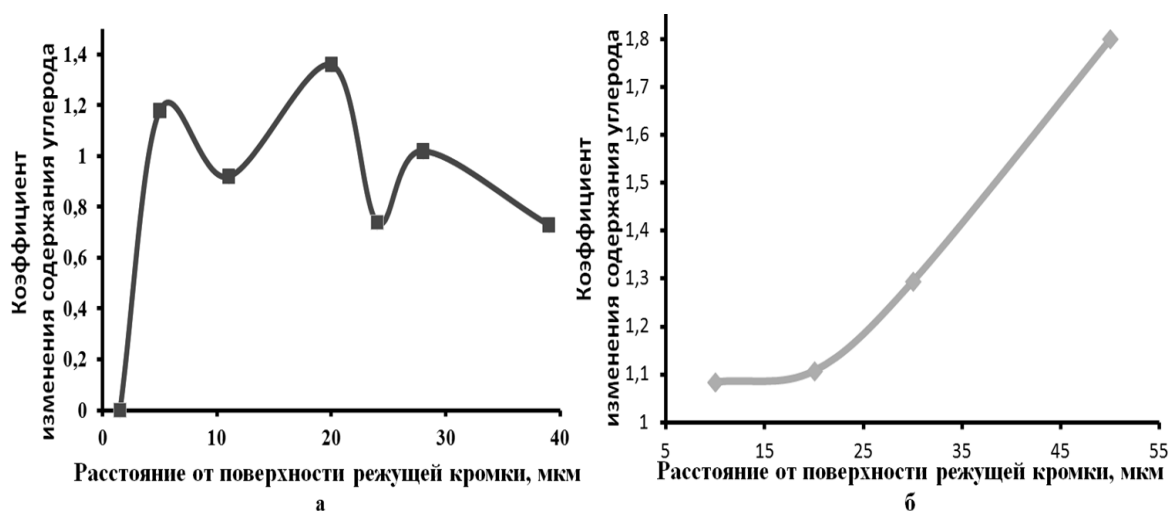


Рис. 2. Изменение концентрации углерода после эксплуатации в режущей кромке ножей из стали 65Г(а) и стали 20X13(б)

Выполнены сопоставительные исследования распределения углерода в ножах после эксплуатации, изготовленных из стали 20X13. В режущей кромке из этой стали концентрация углерода также распределена неравномерно (рис.2, б). Его содержание в различных зонах лезвия ножа изменяется в 1,7 раза (рис.2, б). В процессе эксплуатации происходит обеднение режущей кромки углеродом.

Были исследованы и другие зоны таких ножей (середина и основание), которые работают в условиях циклического воздействия. Среднее содержание углерода в основной части и в лезвии нового ножа из стали 65Г значительно отличаются (рис. 3). Его доля в лезвии в 3,1 раза превышает концентрацию, характерную для основной части ножа. Это обусловлено заточкой лезвия, при которой отмечается частичный распад остаточного аустенита уже на стадии изготовления ножа. При этом доля остаточного аустенита снижается ~ в 3 раза. Среднее содержание углерода в ноже из стали 65Г после эксплуатации практически не изменяется в его основании и середине. Снижение его концентрации в 2, 8 раз (по сравнению с новым) в лезвии ножа после эксплуатации вызвано обезуглероживанием режущей кромки и повышенной концентрацией углерода в локальных зонах у границы с лезвием. В них наблюдается увеличение его средней концентрации на 30%.

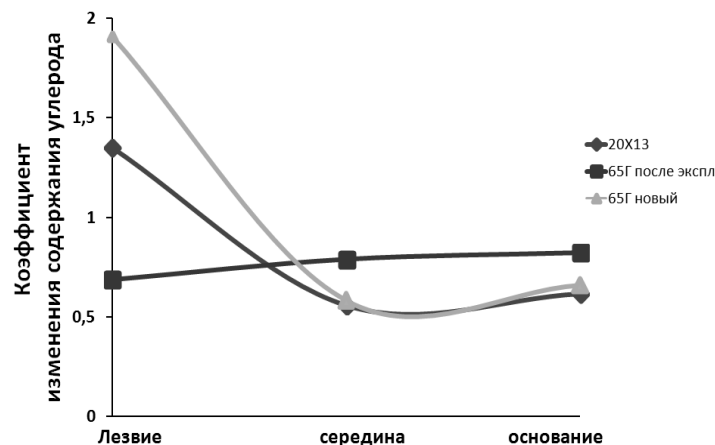


Рис. 3. Изменение средней концентрации углерода в ножах из стали 20X13 и 65Г до - и после эксплуатации

Отмечается существенное отличие в распределении углерода по всему ножу и из стали 20X13 (рис. 3.). В основной части ножа (середина и основание) углерода в 2,3 раза меньше, чем в режущей кромке.

Для количественной оценки особенностей структурных изменений разработана методика математической обработки изображений, полученных микрорентгеноспектральным анализом. Исследовали изменение концентрации карбидов на изображениях на фрагментах 5 на 5, 10 на 10 и 20 на 20 пикселей. Максимальное количество фрагментов содержат минимальное количество карбидов (соответствует 5%). Например, в лезвие нового ножа из стали 65Г их количество колеблется от 53,7 до 89,5%, для ножа из стали 65Г после эксплуатации разброс более значителен от 0,1 до 83,5%. Для ножа из стали 20X13 после эксплуатации количество таких фрагментов значительно меньше - 3,2-64,9%. Эти данные свидетельствуют о том, что стабильность карбидной фазы при эксплуатации ножей из стали 20X13 в 4 раза больше, чем из стали 65Г. Наблюдаемое можно объяснить как большей долей карбидной фазы в стали 20X13, так и ее стабильностью за счет легирования хромом. Из-за большого разброса значений при разных увеличениях изображений было проведено сравнение не только при одинаковых увеличениях, а также усреднены показатели в разных областях ножей. Процентное их содержание с разбивкой через 5 процентов представлено в таблице 1.

Из табл.1 следует, что в лезвии ножа из стали 65Г имеет место максимальное

количество фрагментов с минимальной долей карбидной фазы (табл.1, рис. 4). Это характерно как для нового изделия, так и после эксплуатации. Наблюдаемое свидетельствует о том, что такие карбиды достаточно мелкие и при деформации легко разрушаются и отдают углерод.

Таблица 1

Процентное содержание карбидов																			Область ножа	Примечание
5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	100		
72	3	3	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	Лезвие	65Г до эксплуатации
20	14	10	10	12	13	11	6	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	Основная часть	
65	4	3	2	3	3	4	3	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	Лезвие	65Г после эксплуатации
16	19	18	12	6	4	7	10	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Основная часть	
33	23	15	10	6	4	2	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	Лезвие	20Х13 после эксплуатации
3	8	10	8	8	12	16	12	7	5	3	2	1	1	1	0	0	1	0	Основная часть	

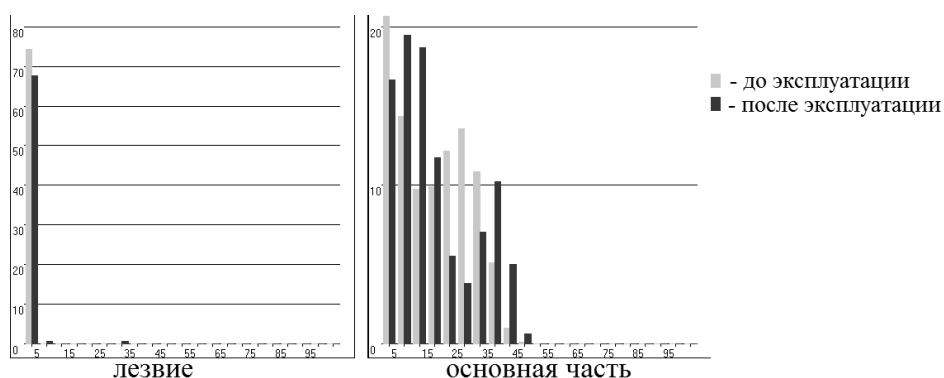


Рис. 4. Процент содержания карбидной фазы на фрагментах изображений ножей из стали 65Г

Процентное содержание карбидной фазы на фрагментах в основной части ножа значительно выше. Это связано с тем, что эта область менее деформирована и карбиды сохранились более крупными. В случае неоднородности распределения карбидов возможен и второй вариант - много мелких, но они расположены близко друг к другу, препятствуя тем самым быстрому их разрушению и диффузии углерода.

Расчет среднего значения процентов карбидов на заданных фрагментах для всей гистограммы проводили по формуле:

$$a_1 = \sum_{j=1}^{21} [0.025 + (j-1) \cdot 0.05 \cdot g_j] \quad (1)$$

$g_j$  -  $j$  - е значение гистограммы

Для расчета средних значений до 15 процентов и свыше 15 формулы имеют вид соответственно:

$$a_2 = \frac{\sum_{j=1}^4 [0.025 + (j-1) \cdot 0.05 \cdot g_j]}{\sum_{j=1}^4 g_j / 100} \quad (2)$$

$$a_3 = \frac{\sum_{j=5}^{21} [0.025 + (j-1) \cdot 0.05 \cdot g_j]}{\sum_{j=5}^{21} g_j / 100} \quad (3)$$

В знаменателе приведена сумма гистограмм, потому что представляет интерес их оценка не только по среднему значению (процент числа случаев), а именно – средний процент случаев карбида на фрагменте. Результаты расчета по формулам (1 – 3) представлены в табл.2.

Таблица 2

**Средние значения концентрации карбидов, соответствующих фрагментам 20 на 20 пикселей**

Средние значения концентрации карбидов			Область ножа	Примечание
по всей гистограмме	до 15%	свыше 15%		
13.875	3.770	52.548	Лезвие	65Г до эксплуатации
18.720	8.789	28.902	Основная часть	
14.798	3.640	44.825	Лезвие	65Г после эксплуатации
18.100	10.101	34.122	Основная часть	
13.890	8.016	38.763	Лезвие	20X13 после эксплуатации
30.045	12.390	36.675	Основная часть	

При анализе фрагментов 20 на 20 изображений различных областей выявлено небольшое увеличение среднего процента карбида в лезвии ножа из стали 65Г после эксплуатации (на 0,92) по сравнению с новым ножом. Это связано с тем, что в лезвии происходит распад остаточного аустенита на феррит и карбиды. При этом, наблюдается уменьшение на фрагментах карбида свыше 15%. Происходит дробление более крупных включений.

В результате исследований были получены данные о том, что среднее значение концентрации карбидов, на фрагментах изображений для стали 20X13 в два раза больше, чем для 65Г (табл.2). Стойкость карбидной составляющей достигается благодаря легирующему элементу (хрому), стабилизирующему ее при эксплуатации.

Для моделирования процесса диффузии на изображениях в работе рассмотрели равномерную прямоугольную сетку расположения 8 точек вокруг средней, на которой заданы значения функций (цвета или оттенки этих точек). Схема расположения этих точек показана на рис. 5.

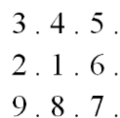


Рис. 5. Схема нумерации точек вокруг – средней

В методике математической обработки изображений [3] было введено такое понятия, как абсолютное значение лапласиана, описывающего диффузию химических элементов (зависимости 4, 6) и абсолютное значение дивергенции, описывающее плотность фрагмента изображения (зависимости 5, 7).

Формула для лапласианов в направлении осей x и y будет иметь вид:

$$l_1 = |c_2 + c_4 + c_6 + c_8 - 4c_1| \quad (4)$$

где  $c$  - цвет соответствующей точки

Формула для дивергенции в направлении осей  $x$  и  $y$  будет иметь вид:

$$d_1 = |c_2 + c_4 - 2c_1| \quad (5)$$

Если рассматриваются производные в направлении 45 градусов к этим осям, то нужно учитывать, что шаг сетки будет больше, чем в направлении осей  $x$  и  $y$ . С учетом этого, лапласиан записывается так:

$$l_2 = |c_3 + c_5 + c_7 + c_9 - 4c_1|/2 \quad (6)$$

Дивергенции записываются так:

$$d_2 = |c_3 + c_5 - 2c_1|/\sqrt{2} \quad (7)$$

В работе был выполнен расчет максимизации или минимизации абсолютной величины лапласиана и дивергенции, используя показатели только  $l_1$  или  $d_1$ . Такой упрощенный вариант оказался неэффективен. Поэтому были проведены расчеты среднего значения абсолютных величин лапласиана и дивергенции с учетом  $l_2$  или  $d_2$ :

$$l = (l_1 + l_2)/2 \quad (8)$$

$$d = (d_1 + d_2)/2 \quad (9)$$

Минимизация дивергенции и лапласианов широко применяется с помощью метода конечных элементов [4]. В рассматриваемой задаче в силу внутренних граничных условий на фотографии (она же электронномикроскопическая является сильно увеличенной по сравнению с макроструктурой) подход метода конечных элементов может быть не совсем оправдан. Поэтому был разработан для моделирования структуры несколько новый, но основанный все равно на идеях экстремумов функционалов.

Приведенные формулы (8, 9) используются, для преобразования изображения структуры для максимизации или минимизации абсолютной величины лапласиана и дивергенции.

Первый этап алгоритма максимизации состоит в том, что рассчитывается  $l$  без перестановок точек; второй этап алгоритма – это перестановка точек 1 и 2, 1 и 3, ..., 1 и 8. Наибольшее значение принимается за истинную перестановку. Затем переходим к следующей точке. Обязательное условие заключается в том, что следующая точка на фрагменте выбирается случайным образом, потому что при детерминированном переборе происходит перенос, а не диффузия. Выявилось огромное различие между этими двумя подходами. При детерминированном переборе получается так, что предыдущие перестановки влияют на последующие, а случайный выбор точек исключает это влияние. На фрагментах 10 на 10 пикселей сначала вычисляли  $x$  координату точки, затем  $y$  координату точки на фрагменте. Данный алгоритм действия повторяем заданное количество раз (например, 100) и переходим к следующему фрагменту. Чем большее число раз будет повторяться процедура перестановки точек, тем больше будут увеличиваться абсолютные значения лапласианов. С увеличением числа итераций замедляется рост данного показателя. Для ускорения счета задается ширина диффузионной области. При установлении истинной ширины диффузионной области нужно использовать гораздо большее число итераций. В процессе компьютерной обработки фотографий при моделировании процесса диффузии углерода сохраняется пропорция между положительными и отрицательными значениями, аналогично исходному изображению. Количество точек с отрицательным значением дивергенции меньше чем с положительной.

Моделирование процесса диффузии углерода по предложенной методике максимизации абсолютных величин лапласиана представлено на рис.6.

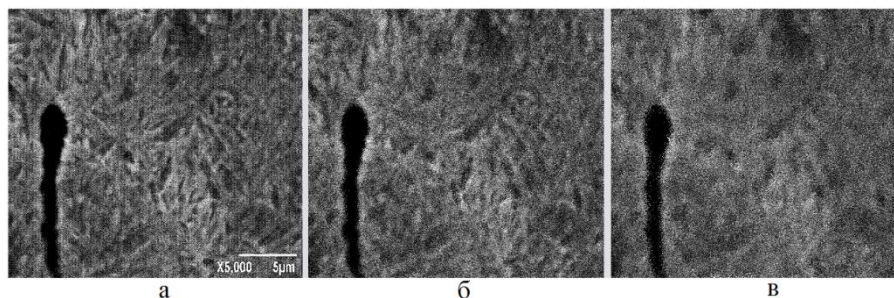


Рис. 6. Исходное изображение (а) структуры средней части ножа из стали 65Г преобразованное 1 раз (б) и 5 раз (в) по предложенной методике максимизации абсолютных величин лапласиана

После моделирования процесса диффузии углерода на изображениях сохраняется структура, которая менее выражена на этих фотографиях, что характеризует перераспределение углерода (большую однородность).

Алгоритм минимизации абсолютных величин лапласианов и дивергенции отличается от алгоритма максимизации только тем, что вместо максимального значения  $l$  при перестановках ведется поиск и - минимального.

При эксплуатации в результате вибрации происходит распад остаточного аустенита. Поэтому была разработана методика математической обработки для исследования изменения его доли на изображениях микроструктур ножей. Точки на заданных фрагментах изображений расположены, согласно схеме на рис.5. В данной модели анализируется сумма цветов точек 1 и 2, 1 и 3, 1 и 4, 1 и 5, 1 и 6, 1 и 7, 1 и 8, 1 и 9. Если их сумма меньше 153 (цвет аустенита), то их цвета остаются прежними. Если же их сумма больше или равна 153, то центральной точке присваивается сумма цветов, а сравниваемой - 0. В случае, когда сумма цветов оказывается больше 255, то центральной точке приписывается цвет 255. В результате такого расчета уменьшается средний цвет фотографии. Данные, полученные с помощью такой модели, для нового ножа аналогичны для изделия после эксплуатации. Изменяется не только средний цвет изображения, но происходит увеличение лапласиана и дивергенции в 5 раз. Изменение структуры показано на рис.7.

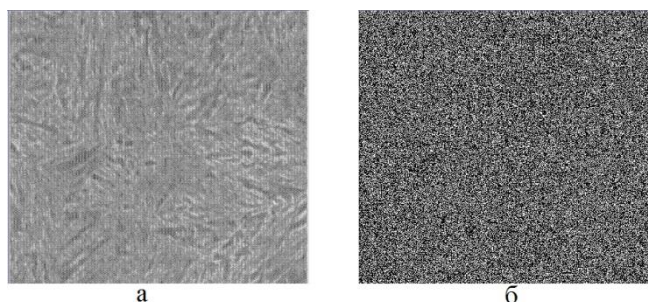


Рис. 7. Структура средней части нового ножа из стали 65Г (а) и ее изменение (б) по предложенной методике

Разработана программа по расчету скорости диффузии углерода (зависимость 10). Поиск среднего значения пути перемещения основан на том, что при расчетах предусмотрено две матрицы для перемещаемых номеров по  $x$  и  $y$  координатам. Если рассмотреть все точки матрицы пикселей на фотографии, то средняя длина перемещения будет равна:

$$s = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [\sqrt{(i-i_1)^2 + (j-j_1)^2}]}{m \cdot n} \quad (10)$$

где  $i_1, j_1$  - координаты матрицы смещаемых точек, которые как раз и находятся на местах с номерами  $i, j$ .

Средняя длина пути при максимизации в лезвии нового ножа составляет 2,49,

что на 14,6% меньше чем в основании. Это связано с большей степенью деформации этой области, степенью ее дисперсности и скоплением дефектов, затрудняющих диффузию углерода. В то же время при минимизации в лезвии режущего инструмента скорость на 10% больше и равна 1,25.

### **Выводы**

Исследования показали, что диффузия углерода в стали 65Г начинается еще на начальных этапах производства проката и подготовки ножа к эксплуатации. В процессе эксплуатации наблюдается неоднородная диффузия атомов углерода в ножах как стали 20X13, так и 65Г.

Для количественной оценки особенностей структурных изменений разработана методика математической обработки изображений, полученных микрорентгеноспектральным анализом. С ее помощью был проведен сопоставительный анализ ножей, изготовленных из стали 20X13 и 65Г до- и после эксплуатации.

Получены данные о том, что среднее значение концентрации карбидов, на фрагментах изображений для стали 20X13 в два раза больше, чем для 65Г. Стойкость карбидной составляющей достигается благодаря легирующему элементу (хрому), стабилизирующему ее при эксплуатации.

Предложен алгоритм расчета и методика математической обработки изображений, позволяющие описать диффузию углерода в различных областях ножа. Оценена скорость в различных зонах режущего инструмента.

### **Литература**

1. 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.
2. Гаврилюк В.Г. Распределение углерода в стали/ В.Г. Гаврилюк – Киев: Наукова думка, 1987. – 208с.
3. 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»]. - Випуск 146. –Харків, 2014. - С.8-24.
4. [http://www.exponenta.ru/educat/systemat/smirnov/s\\_3.asp](http://www.exponenta.ru/educat/systemat/smirnov/s_3.asp)



Skoblo T.S., Romaniuk S.P., Belkin E.L. **Redistribution of carbon in thin cutting tool at operation**

Using the mathematical methods, the comparative analysis of the redistribution of carbon in the knife used in the confectionery industry is carried out on the basis of microstructures images and data of micro X-ray spectroscopic analysis. The features of the carbon redistribution in carbides of steels 65Mn and 20Cr13 during operation are investigated. A model of the carbon diffusion process in various areas of knives is proposed.

**Keywords:** Steel, cutting tool, structure, carbon, mathematical method, phase composition

**References**

1. Skoblo T. S. Processy, proishodjashhie v tonkostennyh nozhah pri ih izgotovlenii i jekspluatacii /T.S.Skoblo, S.P.Romanjuk, E.L.Belkin, A.I.Sidashenko //Promyshlennost' v FOKUSE.– 2014. – № 3. - S.54-57.
2. Gavriljuk V.G. Raspredelenie ugleroda v stali/ V.G. Gavriljuk – Kiev: Naukova dumka, 1987. – 208s.
3. Skoblo T.S. Metodika matematicheskoy ocenki fazovogo sostava stali /T.S.Skoblo, E.L.Belkin, S.P.Romanjuk // Visnik HNTUSG: [«Resursozberigajuchi tehnologii, materiali ta obladnannja u remontnomu virobniectvi»]. - Vipusk 146. –Harkiv, 2014. - S.8-24.
4. [http://www.exponenta.ru/educat/systemat/smirnov/s\\_3.asp](http://www.exponenta.ru/educat/systemat/smirnov/s_3.asp)