

УДК 669.017.3

НОВЫЙ КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ СТРУКТУРЫ

С. П. Романюк, канд. техн. наук
romaniuk.khntusg@gmail.com
ORCID: 0000-0002-9226-2205

Харьковский национальный
технический университет
сельского хозяйства
имени Петра Василенко,
61002, Украина, г. Харьков,
ул. Алчевских, 44

Для повышения эксплуатационной стойкости деталей в производстве и эксплуатации предложен комплексный подход обработки металлографических изображений структур изделий на различных этапах их жизненного цикла. Он основан на применении современной компьютерной программы Thixomet Pro и специально разработанного оптико-математического метода, который дополняет стандартные программы по поиску оптимальных свойств и параметров производства. Проведена оценка металлографических изображений структуры, полученных на оптическом и электронном микроскопах с анализом пикселей фотографий. Сопоставительно проанализированы изменения в структурных составляющих металла двух зон (в основной части и у края рабочей поверхности изделия). В процессе эксплуатации происходит распад менее стабильных структурных составляющих и можно наблюдать уменьшение доли спецкарбидов от 14,4 до 8,15%. Это вызвано влиянием локализации деформации, приводящей к дроблению и выстраиванию дисперсных карбидов под углом 45° по отношению к рабочей поверхности вглубь детали под действием напряжений, которые в процессе эксплуатации являются очагами зарождения и развития трещин. Одновременно отмечается распад карбидов, диффузия углерода и хрома. С помощью математического метода описания структурных изменений установлено, что под действием внешних факторов у края рабочей поверхности выше интенсивность возникающей диффузии химических компонентов. Кроме того, выявлены зоны повреждаемости и максимальной локальной неоднородности, связанной с наличием пор и трещин. Данная методика позволила выявить повышение анизотропии свойств, формируемой в процессе эксплуатации и связанной с деградацией металла, определить степень структурной неоднородности.

Ключевые слова: оптико-математический метод, изображение, структурная неоднородность, дефекты, карбидная фаза, диффузия.

Введение

Постоянно возрастающие требования к надежности современного оборудования приводят к поиску новых методов и подходов при оценке их качества. Повысить работоспособность изделий возможно различными способами на основе оценки поведения металла в процессе эксплуатации, которое зависит от стабильности их структурных составляющих, наличия дефектов и физико-механических свойств. В настоящее время для исследования структуры используется металлографический анализ с последующей математической обработкой полученных изображений. Используя яркостно-цветовые характеристики изображений, проводится идентификация неметаллических включений на основе их цветового тона [1]. В изображениях микроструктур, содержащих контуры, используется сегментация с помощью контурно-структурного метода. Определяется процентное соотношение перлита и феррита [2], размер неметаллических включений [3]. Разработаны методы цифровой обработки изображений для обеспечения неразрушающего контроля материалов и выявления различных видов дефектов, таких, как трещины, царапины, риски. Существуют программы для анализа дефектоскопических и металлографических снимков, которые позволяют автоматически выделять дефекты, производить распознавание включений и оценивать их процентное соотношение в материалах продукции [4,5]. Сформированы математические модели контроля качества шероховатой поверхности и анализа усталостных изломов [6]. Однако анализ существующих и разработанных в настоящее время методов оценки структуры материалов показывает, что они не являются комплексными. Они предназначены только для структурного анализа и не рассматривают взаимосвязь между химическим составом, структурой и свойствами материалов. Для прогнозирования поведения материала при изготовлении деталей в производстве и их эксплуатации весьма эффективным является

моделирование структурообразования при различных условиях их использования. В данном исследовании предложен новый подход, позволяющий оценить процессы структурообразования, осуществлять выбор оптимальных вариантов решений и прогнозировать поведение технических систем. Для этого использовали оптико-математический метод описания процессов формирования структуры и свойств металла для повышения эксплуатационной стойкости деталей.

Основная часть

Целью статьи является разработка комплексного подхода обработки металлографических изображений структур изделий на различных этапах их жизненного цикла. В данной работе исследования проводили на деталях, изготовленных из стали X12, после окончания срока их службы.

Предложен комплексный подход, который основан на применении стандартной современной компьютерной программы Thixomet Pro [7] и специально разработанного оптико-математического метода обработки металлографических изображений [8], а также оценки анизотропии структуры.

Оба используемых метода основаны на совмещенной оценке металлографических изображений структур, полученных на оптическом и электронном микроскопах с анализом пикселей на фотографиях, которые имеют цветовую характеристику от 0 до 255 оттенков. В ранее проведенных исследованиях было показано [9], что эти цвета делились на 16 одинаковых интервалов и описывали 3 группы фаз, которые включали с 1 по 9 феррит (оттенки цветов от 0 до 153), 10 – аустенит (мартенсит) (от 153 до 170), 11–16 – карбиды (от 170 до 255). Существенное влияние на распределение фаз и их изменчивость оказывают наличие растворенных в них углерода и легирующих компонентов, режимов термообработки и деформации.

Изображения структуры инструмента из стали X12 после эксплуатации и обработки результатов с помощью программы Thixomet Pro выявили, что в процессе эксплуатации происходят изменения цветовых характеристик различных фаз (рис. 1), что свидетельствует об их деградации. Доля спецкарбидов в средней части инструмента, которая не подвергалась воздействию деформации, составляет 14,4% и они соответствуют цветам от 121 до 255 (рис. 1, б).

Сопоставительно проанализировав изменения в структурных составляющих металла двух зон инструмента (см. рис. 1), следует отметить, что у края рабочей поверхности в процессе эксплуатации происходит распад менее стабильных структурных составляющих и можно наблюдать уменьшение доли карбидной фазы до 8,15% с сокращенным диапазоном цветовых оттенков 160–255 (см. рис. 1, г). Влияние деформации также проявляется в том, что раздробленные карбиды выстраиваются под углом 45° по отношению к рабочей поверхности вглубь детали в процессе эксплуатации и с учетом характера действия напряжений эти зоны являются очагами зарождения трещин.

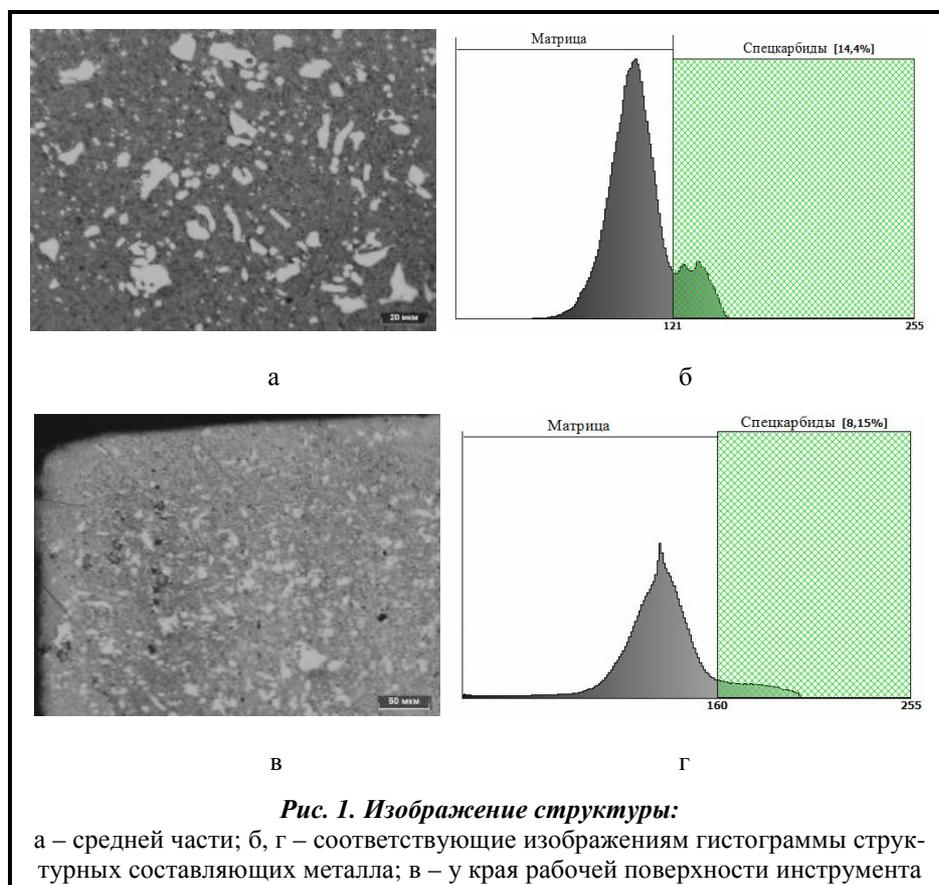


Рис. 1. Изображение структуры:

а – средней части; б, г – соответствующие изображениям гистограммы структурных составляющих металла; в – у края рабочей поверхности инструмента

Одновременно происходит распад карбидов, диффузия углерода и хрома, что подтверждают результаты локального определения этих компонентов микрорентгеноспектральным анализом (рис. 2). Локально определяли химический состав и спецкарбиды хрома в разных зонах изделия. В центральной части инструмента они содержат 44,11% Cr (табл. 1), концентрация которого существенно уменьшается у края рабочей поверхности и достигает лишь 26,98–27,64% (табл. 2).

Таблица 1. Химический состав структуры металла в центральной части инструмента (рис. 2, а)

Спектр	C	Si	Cr	Mn	Fe	Cu	Анализируемая зона
1	4,70	0,27	11,82	0,69	82,21	0,30	Матрица
2	8,55	–	44,11	–	47,34	–	Карбид

Таблица 2. Локальный анализ у края рабочей поверхности в зоне дробления карбидов при эксплуатации

Спектр	C	Na	Si	V	Cr	Mn	Fe	Mo	O	Примечание
1	4,53	–	–	0,15	27,64	–	29,53	0,34	37,81	рис. 2, б
1	7,09	–	0,16	0,22	26,98	–	65,55	–	–	рис. 2, в
2	3,67	0,28	0,33	–	8,28	0,39	87,06	–	–	

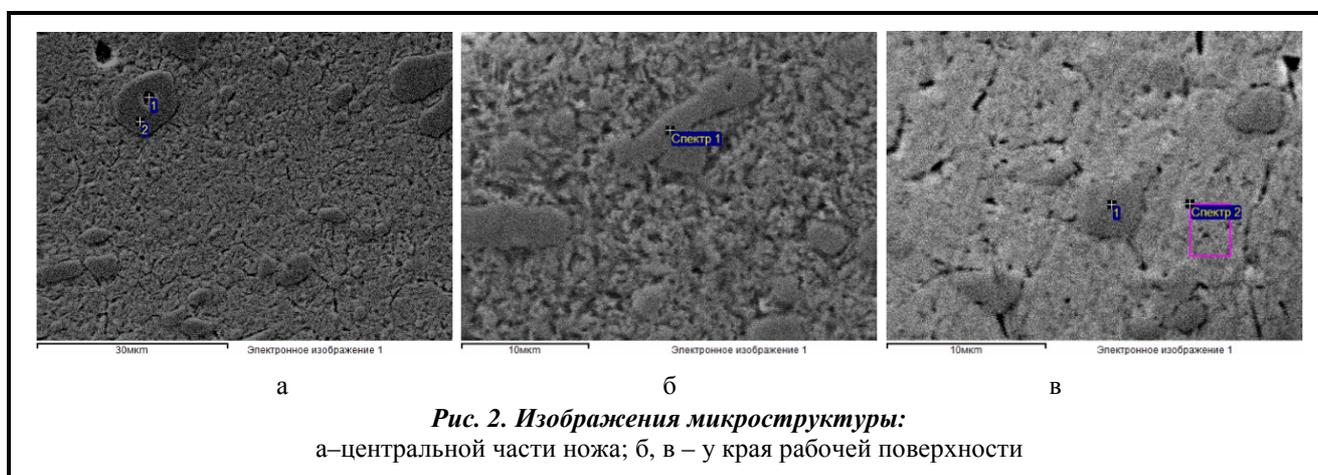


Рис. 2. Изображения микроструктуры:
а–центральной части ножа; б, в – у края рабочей поверхности

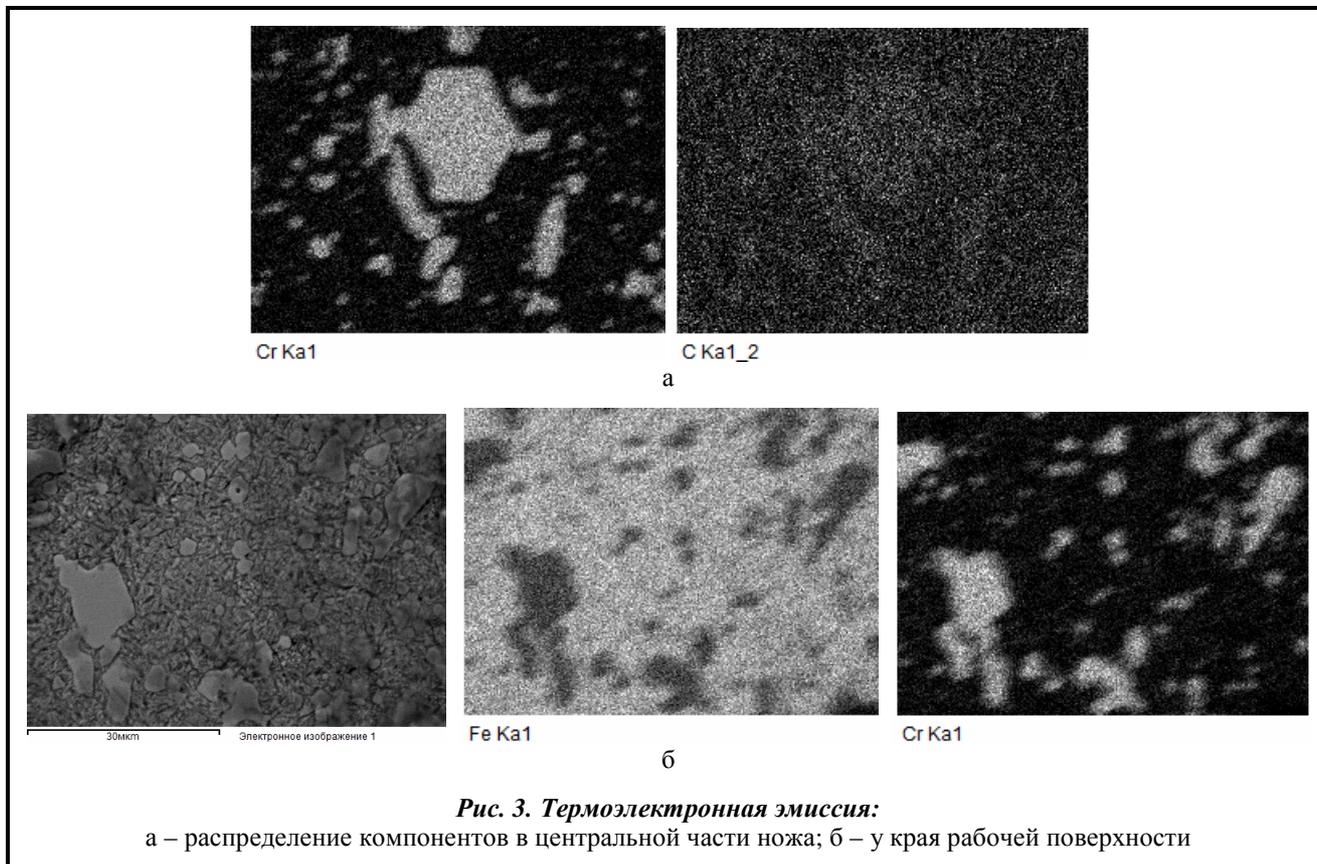
Установлено, что в процессе эксплуатации у края рабочей поверхности также понижается и концентрация углерода в карбидной фазе. Выявленная локальная карбидная неоднородность (рис. 3) сопровождается понижением концентрации хрома у края рабочей поверхности по сравнению с центральной частью инструмента на 6,7% и повышением содержания углерода в 1,58 раз (табл. 3).

Таблица 3. Интегральный анализ центральной части ножа (рис. 3, а) и у края рабочей поверхности (рис. 3, б)

Элемент	Весовой %	
	Центральная часть	У края рабочей поверхности
C	6,85	10,83
Al	0,10	0,22
Si	0,28	0,22
Cr	12,17	11,36
Mn	0,44	0,41
Fe	78,65	64,55
Cu	1,07	1,21
Mo	0,45	–
O	–	10,75
Ni	–	0,17
S	–	0,14
Cl	–	0,07
V	–	0,06
Итого	100,00	100,00

Сопоставляя распределение компонентов при термоэлектронной эмиссии, видно, что доля железа в мелких карбидах уменьшается в большей степени, чем снижается концентрация хрома, а углерод распределяется по анализируемой зоне более равномерно.

Анализом установлено, что у края рабочей поверхности ближе к зоне воздействия максимальных напряжений (рис. 3, б) отмечается наиболее интенсивная диффузия железа из спецкарбида хрома.



Формируемая неоднородность структуры (связанная с дроблением легированных карбидов под действием возникающих напряжений) по сечению инструмента может существенно понизить эксплуатационные свойства детали.

Для качественного и количественного анализа структуры и оценки дисперсности внутри каждой фазы, связанной с выявленной локальной неоднородностью, предложена методика математической обработки металлографических изображений [9]. Она основана на анализе пикселей полученного цифрового металлографического изображения в горизонтальном и вертикальном направлениях с определением следующих показателей:

- абсолютного значения дивергенции (данный показатель описывает плотность фрагмента изображения; чем больше значения дивергенции, тем интенсивнее происходят структурные изменения);
- абсолютных значений первого, третьего и четвертого лапласианов соответственно (описывают диффузию химических компонентов);
- обобщенного градиента, который оценивали по абсолютной величине (является средней эффективной скоростью изменения цвета, что соответствует интенсивности возникающих деформаций). Данные характеристики описывают энергетические параметры, соответствующие диссипации энергии.

Для металлографического анализа структуры металла инструмента использовали подготовленный поперечный шлиф. Всего анализировали 17 фотографий разных зон инструмента. Одинадцать изображений были получены на электронном микроскопе и 7 – на оптическом. Результаты значений описанных выше функций представлены в табл. 4.

Таблиця 4. Значения средних анализируемых функций

Цвет	Среднеквадратичное отклонение цвета	Обобщенный градиент	Лапласиан	3-й лапласиан	4-й лапласиан	Дивергенция	№ фото
72,3	42,7	43,2	127,3	215,3	407,8	71,7	1
103,3	54,0	46,7	146,8	253,8	478,4	82,9	4
95,5	32,5	32,4	97,0	168,7	317,1	55,3	5
107,1	28,9	30,5	89,8	152,7	288,6	50,8	6
110,7	32,1	32,8	95,6	164,3	310,0	54,9	2
128,7	29,5	31,6	94,0	157,0	295,7	53,3	3
117,1	29,6	29,5	85,8	146,4	275,5	49,3	7
143,4	51,6	47,9	142,2	250,0	473,4	81,6	8
93,6	23,1	22,5	68,1	121,0	231,3	37,8	9
58,4	15,7	15,6	48,3	83,1	156,9	27,0	10
95,0	29,2	25,7	75,2	127,8	236,9	45,2	11
112,6	18,0	14,2	47,9	85,6	161,1	27,0	12
43,0	22,3	16,7	62,2	117,2	228,3	32,5	13
41,5	21,1	15,7	58,6	110,6	215,1	30,7	14
95,5	17,6	13,8	48,2	88,4	168,8	26,6	15
89,3	17,3	13,6	48,3	89,2	171,3	26,3	16
60,6	23,6	18,5	64,0	116,9	222,8	35,5	17
60,8	23,5	18,5	64,0	117,2	223,3	35,4	18

Первое, четвертое, пятое, шестое изображения с электронного микроскопа и двенадцатое фото с оптического относятся к краю рабочей поверхности. Изображения 9–11 – это боковая поверхность ножа, подвергаемая деформации при эксплуатации.

Полученные результаты позволяют оценить возникающую диффузию и формируемые структурные изменения, вызванные деформацией в процессе эксплуатации различных зон инструмента. Для этого сравнивали полученные изменения функции в различных зонах инструмента. Так как принцип работы микроскопов и локальность анализа структуры отличаются, то целесообразно проводить сравнение металлографических изображений отдельно для каждого из них.

При анализе изображений с оптического микроскопа установлено, что у края рабочей поверхности повышены энергетические параметры диссипации, характеризующиеся интенсивностью возникающих диффузионных процессов и изменениями плотности фрагмента.

Кроме того, оценивали неоднородность структуры в вертикальном и горизонтальном направлениях (табл. 5). Чем ближе этот показатель к единице, тем формируемая структура более однородная.

Таблиця 5. Значения средней неоднородности структуры инструмента

Горизонтальная неоднородность	Вертикальная неоднородность	№ фото
0,832	0,518	1
0,938	0,577	4
0,930	0,759	5
0,935	0,840	6
0,943	0,814	2
0,942	0,891	3
0,961	0,853	7
0,966	0,731	8
0,971	0,863	9
0,941	0,849	10
0,914	0,786	11
0,996	0,920	12
0,976	0,735	13
0,975	0,745	14
0,993	0,921	15
0,993	0,915	16
0,982	0,766	17
0,982	0,766	18

Из анализа полученных данных следует, что под действием деформации у края рабочей поверхности формируется максимально однородная структура как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях (см. табл. 5, фото № 12). При этом металлографически выявляются зоны с локальной повреждаемостью и повышенной неоднородностью, связанной с наличием пор и трещин, что влияет на прочность и эксплуатационную стойкость инструмента. Повышенная анизотропия свойств в данном случае определяет степень деградации металла (характерна для вертикального направления литой заготовки по теплоотводу). Такое направление структурной неоднородности всегда формируется при производстве литых изделий и из проката. В процессе эксплуатации зоны с меньшей анизотропией свойств повреждаются в большей степени (дробятся карбиды, интенсифицируются диффузионные процессы), наряду с этим их анизотропия приближается к 1,0.

Выводы

Проведены комплексные исследования металлографических изображений при помощи стандартной современной компьютерной программы Thixomet Pro и специально разработанного и усовершенствованного оптико-математического метода. Данный подход позволил выявить изменения фазового состава, деградацию структуры по изменчивости цветовых характеристик карбидной фазы, связанных с процессами, возникающими в период эксплуатации. С помощью математического метода описания структурных изменений одновременно установлена и максимальная локальная неоднородность у края рабочей поверхности, связанная с наличием пор и трещин.

Литература

1. Чубов А. А. Проведение автоматизированного металлографического анализа на примере изображений микроструктур высокопрочного чугуна. *Вестн. академии*. 2007. № 2 (12). С. 106–114.
2. Ермаков А. А., Орлов А. А., Садыков С. С., Стародубов Д. Н. Методы и алгоритмы обработки и анализа дефектоскопических и металлографических снимков. Владимир: Владимир. ун-т, 2008. 112 с.
3. Садыков С. С., Орлов А. А., Ермаков А. А. Теория, алгоритмы и методика обработки линейчатых образов на дефектоскопических снимках. *Изв. вузов. Приборостроение*. 2009. № 2. С. 11–16.
4. Orlov A. A., Sadykov S. S., Zhyznyakov A. L. Using the Hough transform for separation and suppression the rib in X-ray scenes. *Pattern Recognition and Image Analysis (Advances in Math. Theory and Appl.)*. 2001. Vol. 11. Iss. 2. P. 365–369.
5. Orlov A. A., Sadykov S. S. Analysis and syntheses of the rift images. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2009. Vol. 19. Iss. 1. P. 186–189. <https://doi.org/10.1134/S1054661809010301>.
6. Садыков С. С., Яковлев А. В. Математическая модель шероховатой поверхности. Формирование и исследование. *Завод. лаб.* 2003. № 8. С. 32–35.
7. 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 atomic sci. and techn. Ser. Plasma Physics*. 2018. No. 6. P. 300–303.
8. Skoblo T. S., Romaniuk S. P., Sidashenko A. I., Taran V. S., Taran A. V., Dorozhko I. I., Pilgui N. N. Complex evaluation of structural state degree of strengthening nanocoatings. *Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics*. 2019. No. 1 (25). P. 225–228.
9. Скобло Т. С., Белкин Е. Л., Романюк С. П. Методика математической оценки фазового состава стали. *Вісн. Харк. нац. техн. ун-ту с/г*. 2014. Вып. 146. С. 8–24.

Поступила в редакцию 13.11.2019

Новий комплексний підхід при математичному моделюванні металографічних зображень структури

С. П. Романюк

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка,
61002, Україна, м. Харків, вул. Алчевських, 44

Для підвищення експлуатаційної стійкості деталей у виробництві та експлуатації запропоновано комплексний підхід обробки металографічних зображень структур виробів на різних етапах їх життєвого циклу. Він ґрунтується на застосуванні сучасної комп'ютерної програми Thixomet Pro та спеціально розробленого оптико-

математичного методу, який доповнює стандартні програми з пошуку оптимальних властивостей і параметрів виробництва. Проведено оцінку металографічних зображень структури, отриманих на оптичному та електронному мікроскопах з аналізом пікселів фотографій. Порівняльно проаналізовані зміни в структурних складових металу двох зон (в основній частині і біля краю робочої поверхні виробу). В процесі експлуатації відбувається розпад мени стабільних структурних складових та можна спостерігати зменшення частки спецкарбідів від 14,4 до 8,15%. Це викликано впливом локалізації деформації, що призводить до подрібнення і вибудовування дисперсних карбідів під кутом 45° по відношенню до робочої поверхні всередину деталі під дією напружень, які в процесі експлуатації є осередками зародження і розвитку тріщин. Одночасно відзначається розпад карбідів, дифузія вуглецю і хрому. За допомогою математичного методу опису структурних змін встановлено, що під дією зовнішніх чинників біля краю робочої поверхні вище інтенсивність дифузії хімічних компонентів, яка виникає. Крім того, виявлено зони пошкоджуваності та максимальної локальної неоднорідності, пов'язаної з наявністю пір та тріщин. Дана методика дозволила виявити підвищення анізотропії властивостей, що формується в процесі експлуатації та пов'язана з деградацією металу, визначити ступінь структурної неоднорідності.

Ключові слова: оптико-математичний метод, зображення, структурна неоднорідність, дефекти, карбідна фаза, дифузія.