

**Скобло Т.С.,\***  
**Сидашенко А.И.,\***  
**Плугатарев А.В.,\***  
**Клочко О.Ю.,\***  
**Белкин Е.Л.,\***  
**Иващенко В.Н.\*\***

\*Харьковский национальный технический университет с/х им. П. Василенко,  
\*\*ООО НПП "SINTA",  
г. Харьков, Украина,  
**E-mail:** [stamarasemenovna@mail.ru](mailto:stamarasemenovna@mail.ru)

## ОСОБЕННОСТИ ИЗНОСА ДЕТАЛЕЙ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ СОВРЕМЕННЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

УДК 621.436:539.3

В результате комплексных исследований изучены особенности износа и выявлена кинетика структурных изменений на поверхности трения детали, имеющей покрытие аморфного типа с нановключениями.

**Ключевые слова:** покрытие, износ, аморфная структура, наноалмазы, свойства, комплексные методы анализа.

### Введение

В последние годы в Украине всё больше поступает на автомобильный рынок машин зарубежного производства. Двигатели, которых оснащены самыми прогрессивными системами питания, информации о способах ремонта топливной аппаратуры производители не предоставляют, что затрудняет выполнение качественного восстановления и требует создания новых технологических процессов.

В ряде случаев при эксплуатации машин имеют место отказы в результате экстремальных ситуаций, при которых происходит заклинивание прецизионных пар за счет попадания абразивных частиц в сопряжения. Это способствует схватыванию, и в ряде случаев, к разрушению рабочей поверхности деталей топливной аппаратуры.

### Цель и постановка задачи

Целью данной работы является изучение свойств покрытий новых композиций, а также исследование процессов, происходящих на поверхности трения для выбора технологического процесса ремонта таких деталей.

В задачи исследования входило: установить тип и состав покрытия деталей, поступающих в ремонт; определить характер износа, а также остаточную толщину покрытия; оценить особенности структурных изменений при трении; выявить кинетику процесса изнашивания; разработать предложения по восстановлению таких деталей в условиях ремонтных мастерских Украины.

### Методы исследований

Для решения поставленных задач использовали комплексный подход, который базировался на детальном изучении поверхности трения металлографическими исследованиями, оценкой микротвердости, микрорентгеноспектральным и рентгеноструктурным анализами, а также при помощи оригинальной методики математического анализа металлографических изображений. При этом такие исследования проводили в различных зонах деталей, характеризующиеся исходным состоянием и, отличающиеся различной степенью износа.

Микротвердость оценивали при нагрузке 0,49 Н на приборе нового поколения UIT-HVmicro-1 с вертикальной нагрузкой на индентор и автоматическим ее определением. Микрорентгеноспектральный анализ структурных составляющих проводили на растровом электронном микроскопе-микроанализаторе JEOL JSM-6390LV при увеличениях 1000 - 2000 крат и растровом электронном микроскопе JSM-820 Link "JEOL" с системой рентгеновского микроанализа Link AN10/85S "Link Analytical". Рентгеноструктурный анализ - на дифрактометре ДРОН-3М в излучении Cu K $\alpha$ .

### Результаты исследования и их обсуждение

Исследованы детали различных производителей зарубежных фирм с отличающимся периодом эксплуатации. На рис. 1 показана экстремальная ситуация, при которой полностью износилось покрытие и произошло разрушение ротора за счет его заклинивания. На рис. 2 представлена деталь, эксплуатировавшаяся в машине канадского производства.

Для реализации поставленных в работе задач первую деталь (рис. 1) разрезали на образцы, которые отражали различные по интенсивности зоны трения, что хорошо видно даже при макроанализе. Исследованиями установлено, что ротор топливного насоса изготовлен из стали 60X (содержание количества компонентов, %: 0,6C; 0,47Si; 1,64Cr) Вторую деталь (рис. 2) анализировали в различных зонах, которые также характеризуют – исходное состояние (зона 1, 2), участки износа различной степени (зоны 3, 4).



Рис. 1 – Ротор топливного насоса типа VRZ ZEXEL производства Японии

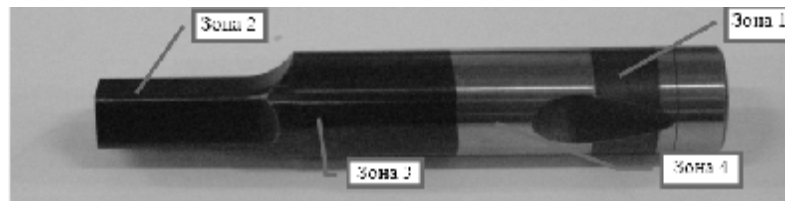


Рис. 2 – Образец производства Канады

Анализом установлено, что обе исследуемые детали имеют одинаковое покрытие и характер износа. Можно предположить, что упрочнение выполнено по технологии Японии. Покрытие имеет черный цвет и состоит из композиции вольфрам-кобальт-углерод (наноалмазы). При металлографическом исследовании поверхности трения – покрытие белого цвета.

В зонах, где процесс трения отсутствовал, четко просматривалась структура покрытия, которая соответствовала аморфному состоянию, что также подтверждалось формой отпечатка (рис. 3, б) и показателем уровня микротвердости, соответствующего средним значениям основного металла (3,65 ГПа). Кроме того, методом царапания установлен пластический характер покрытия в нерабочих зонах (рис. 3, б).

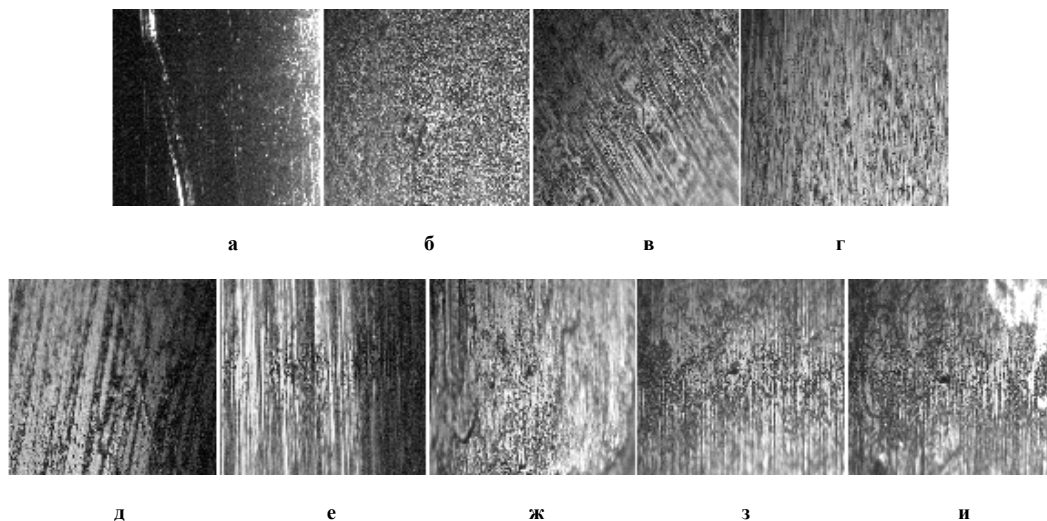


Рис. 3 – Изображения фрагментов поверхности исследуемой детали по мере возрастания интенсивности износа: а – область покрытия до эксплуатации,  $\times 10$ ; б – то же, аморфная структура; в – начало эксплуатации, четко видны деформационные полосы – следы трения, деформация в отпечатке индентора образует полосы сдвига; г, д, е – развитие процесса; ж, з, и – уменьшение деформационных полос в результате разрушения структуры покрытия, появление рельефной ячеистой структуры, деформация в зоне отпечатка индентора – однородна; б - г  $\times 500$

В зонах деталей, где трение было незначительным (рис. 3, в), на рабочей поверхности уже проявилось кристаллическое строение. Сформировались белые полосы по направлению трения различной толщины от 1 - 2 мкм до 3 - 6 мкм.

С увеличением интенсивности трения полос становится меньше, они утолщались до 6 - 8 мкм и дробились на отдельные зерна (рис. 3), а от бывших тонких полосок оставались лишь отдельные их фрагменты.

В зонах с максимальным износом формируется сетчатая структура. На более ранней стадии такого процесса внутри сетки сохраняются фрагменты полосчатой структуры. При этом границы сетки довольно тонкие и представлены фрагментами включений.

С нарастанием износа сетка утолщается и практически исчезает, внутри нее четко выраженная полосчатая структура. О её существовании свидетельствуют лишь отдельные фрагменты, сохраняющие полосчатую направленность (рис. 3).

Зона 4 (рис. 2) без покрытия характеризуется незначительным износом с четко выраженными полосами скольжения.

Методом рентгеноструктурного анализа поверхности с максимальным износом установлено, что глубина покрытия составляет ~ 2 мкм и, независимо от наличия полос трения, является однородной и также имеет аморфную структуру.

Результаты измерения микротвердости различных зон приведены в (табл. 1).

Таблица 1

**Микротвердость различных зон**

Анализируемые зоны	Средние значение микротвердости, ГПа при нагрузке 0,49Н
Исходное покрытие (металл подложки)	3,65
Первый этап максимального трения	10,27
Окончательный этап максимального трения	5,60
Без покрытия ( зона 4, рис. 2) - наклеп	8,31

Из анализа данных видно, что исходное состояние покрытия, (аморфная структура) соответствует материалу детали (подложке).

На первом этапе максимального износа, когда появляются направленные полосы трения, микротвердость наиболее высокая и достигает 10,27 ГПа. В зоне наиболее интенсивного износа, когда полосы распадаются на отдельные фрагменты, микротвердость существенно снижается, и составляет 5,60 ГПа. В зоне 4 (рис. 2) без покрытия структура рабочей поверхности также характеризуется наличием полос, расположенных по направлению трения детали. В этой зоне в процессе эксплуатации полосы не разрушаются, и микротвердость за счет наклепа достигает 8,31 ГПа.

Из приведенных данных видно, что максимальная твердость достигается в покрытии на начальном этапе максимального трения. Можно предположить, что в аморфной структуре формируются углеродные кластеры и нанодиамазы, которые и определяют ее упрочнение.

Для установления кинетики структурных изменений на поверхности трения и уровня микротвердости при нарастании интенсивности процесса использовали разработанный метод математического описания.

В ходе исследований проанализированы цифровые изображения фрагментов исследуемых структур поверхности трения на образцах (рис. 3). Наблюдается гомогенная деформация на поверхности отпечатка индентора в зоне интенсивного трения, что характерно для пленок за счет относительного скольжения "столбиков" [1].

На рис. 3, в показана структура поверхности, сформированная в результате трения на начальном этапе эксплуатации, четко видны деформационные полосы светлого цвета. По отпечатку наблюдается локализация сдвигов в направлении усилия при индентировании, что подтверждает наличие кластеров и нанодиамазов непосредственно на поверхности трения.

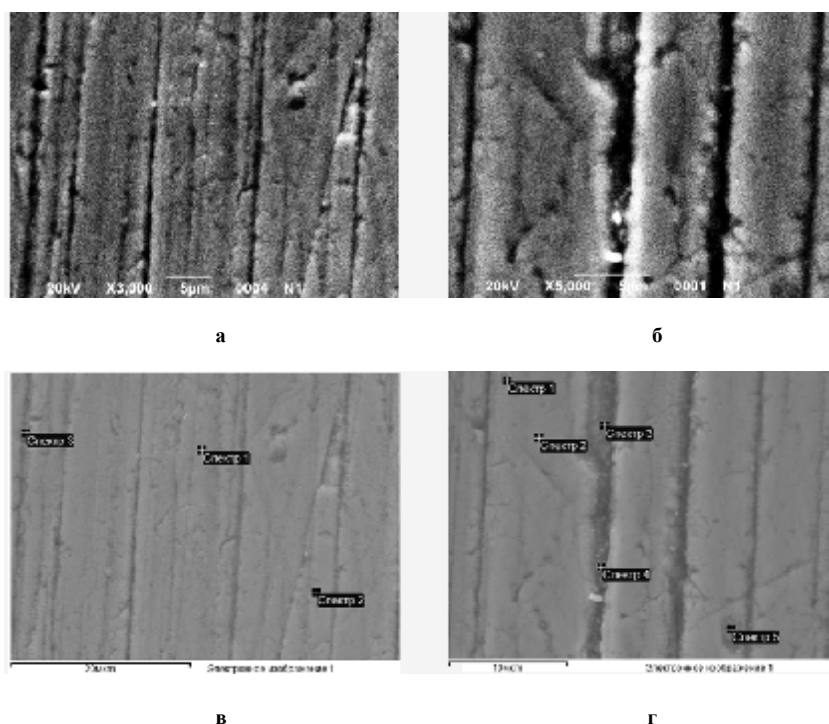
На рис. 3, г - и представлены фотографии поверхности исследуемой детали, полученные в течение всего процесса эксплуатации, по мере возрастания интенсивности трения и износа. В результате деформации происходит увеличение межреберных границ, и возникают дефекты плотной упаковки. Исчезают ярко выраженные полосы сдвига на поверхности отпечатка индентора, деформация становится более однородной.

Проведенные микрорентгеноспектральные исследования (рис. 4, табл. 2) в зонах деформационных полос, возникших на поверхности в результате трения в начальный период эксплуатации и после значительного износа, выявили его неоднородность.

Так, при начальной степени износа, рисунок поверхности имеет ярко выраженный рельеф – появляются многочисленные следы трения в виде полос скольжения, а также видны области с выкрошившимися твердыми фазами.

Микрорентгеноспектральным анализом установлено в деформационной полосе (рис. 4, в, спектр 3 и табл.2) повышение в 1,5раза содержания углерода, появление до 0,56 % хрома и незначительное (~ на 2 %) уменьшение вольфрама, что связано с локальным утонением покрытия и захватом анализатором зоны основного металла. Между тем, однородность структуры покрытия остается достаточной высокой – содержание вольфрама в зонах деформации и недеформированных отличаются незначительно

(табл. 2). Несколько уменьшено количество железа в спектре 2 (в 1,2 раза), скорее всего – связано с меньшим износом анализируемой зоны (рис. 4, а и табл. 2).



**Рис. 4 – Зоны, деформированные в процессе трения:**  
а, в – с небольшим износом поверхности (начало эксплуатации);  
б, г – с высоким износом (после продолжительной эксплуатации), где а, б – съемка во вторичных электронах;  
в, г – области микрорентгеноспектрального анализа

Таблица 2

### Микрорентгеноспектральный анализ областей трения

Область анализа	Химические элементы, %												
	C	N	O	Na	Al	S	K	Ca	V	Cr	Fe	Co	W
Зона с невысоким износом поверхности (рис. 2, в)													
Спектр 1	25,53	5,0	4,24	-	-	0,41	-	-	0,21	0,28	1,42	3,48	59,43
Спектр 2	29,44	-	2,4	-	-	-	-	-	-	0,43	1,43	3,61	62,69
Спектр 3	27,45	-	8,8	-	-	-	-	-	-	0,8	1,8	3,57	57,58
Спектр 4	28,36	3,76	19,73	0,62	0,32	0,17	0,35	0,34	-	0,97	1,86	2,7	40,82
Спектр 5	26,03	-	4,79	-	-	-	-	-	-	0,40	1,64	3,69	63,45
Зона с высоким износом поверхности (рис. 2, г)													
Спектр 1	35,84	-	3,52	-	-	-	-	-	-	0	1,59	2,77	56,28
Спектр 2	34,62	-	3,84	-	-	-	-	-	-	0	1,31	3,13	57,09
Спектр 3	34,58	-	5,80	-	-	-	-	-	-	0,56	1,56	3,26	54,24

В областях, подвергавшихся износу в процессе длительной эксплуатации (рис. 4, г), установлено появление продуктов окисления (от 2,4% O в спектре 2 до 19,73% O в спектре 4, табл. 2). Во всех анализируемых областях появляется хром (от 0,28 % до 0,97 %), в среднем увеличивается концентрация железа (~1,64 %). Следует отметить, что в этих областях наблюдается рост неоднородности структуры покрытия из-за различной локальной степени износа. Так, значительно отличается от других зон химический состав в деформационной полосе (рис. 4, г, спектр 4): содержание вольфрама уменьшается в среднем в 1,5 раз (до ~41 %), повышенное содержание хрома и кислорода, азота, также появляются Na, Al, S, K, Ca, которые, очевидно, можно отнести к продуктам, входящим в состав дизельного топлива, попавших в процессе эксплуатации. В спектре 1 идентифицировано повышенное содержание азота (до 5 %), серы (до 0,41 %) и ванадия (0,21 %), также, скорее всего, попавшие на поверхность при эксплуатации или, входящие в виде включений в основной металл деталей сопряжения. Содержание углерода в этих областях колеблется незначительно (в пределах 14 %).

Для определения равномерности износа анализировали изменение концентрации железа и хрома, которые содержатся в основе деталей, от доли вольфрама в покрытии (рис. 5). Из полученных данных

следует, что в первый период эксплуатации, когда доля вольфрама максимальна (55 - 63 %), концентрации железа и хрома – минимальны, т.е. в меньшей мере при микрорентгеноспектральном анализе захватывается основной металл детали (пятно зонда прибора до 3 мкм). В этот период наблюдается и формирование значительной неоднородности слоя аморфного покрытия. Установлен разброс параметров, что связано со структурной неоднородностью.

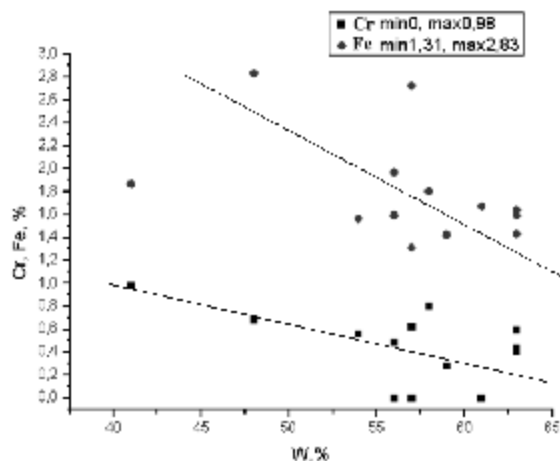


Рис. 5 – Зависимость изменения концентраций хрома и железа в зависимости от концентрации вольфрама

Для идентификации особенностей формирования структуры и микрорельефа на поверхности трения применили математическую обработку металлографических изображений с использованием оригинальной программы на основе разработанного метода аналитического анализа [2].

В качестве его математической основы использован метод оптико-структурного машинного анализа, оценивающий изображения, различающиеся по их статистическим характеристикам (элементам изображения – пикселей и плотности их распределения).

В работе рассмотрено распределение сочетаний условных цветов для 24 пикселей вокруг среднего с координатами  $c_j$  на плоскости изображения [3].

Каждой координате пикселя цифрового изображения задавали значение условного цвета, характеризующего процессы, протекающие на поверхности исследуемых деталей в период эксплуатации в условиях трения.

Произведена компьютерная обработка полученных в формате bmp изображений. Проведены цифровые оценки этих фотографий в формате полутоновых изображений  $rgm$ , которые включают 256 оттенков серого цвета (в дальнейшем, именуемых цветом: от 0 до 255) по специально разработанной программе. Расчет значений условного цвета осуществляли путем решения системы дифференциальных уравнений Навье - Стокса, представленных в переменных функции тока и вихря в конечно-разностной форме [4]. В результате условный цвет в каждой точке вычисляли при помощи абсолютных значений лапласиана и дивергенции, соответственно описывающих диффузию химических элементов и плотность фрагмента изображения (зоны уплотнения и разряжения). Для удобства все выявленные условные цвета были сгруппированы в 16 групп, которые представлены в табл. 3.

Таблица 3

#### Группировки цветов

№ группы условного цвета	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Интервал условного цвета	0 - 7	8 - 24	25 - 41	42 - 58	59 - 75	76 - 92	93 - 109	110 - 126	127 - 143	144 - 160	161 - 177	178 - 194	195 - 213	214 - 230	231 - 247	248 - 255
Условный цвет группы	0	17	34	51	68	85	102	119	136	153	170	189	206	223	240	255

По результатам вычислений построены гистограммы интегрального распределения соответствующего условного цвета для анализируемых фрагментов (табл. 4).

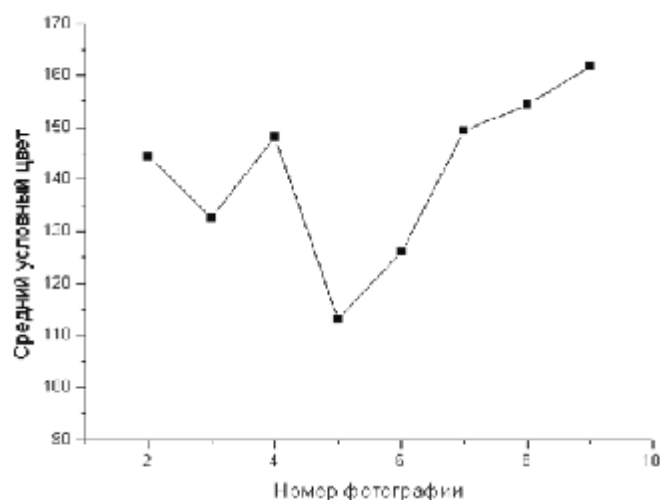
Таблица 4

**Гистограммы интегрального распределения групп условного цвета, %**

Содержание, % группы условного цвета																№ фото
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
7,88	0,96	0,0	0,0	39,09	30,48	0,404	0,0	0,0	4,86	8,58	2,38	0,0	0,01	1,93	6,09	1
5,16	0,519	0,0	0,0	4,98	23,59	0,294	0,0	0,1	23,98	26,85	2,50	0,0	0,46	6,41	6,73	2
2,76	0,50	0,0	0,0	8,87	31,88	1,887	0,0	0,2	15,53	26,90	3,45	0,0	0,49	3,19	4,92	3
7,36	0,02	0,0	0,0	2,92	22,71	0,374	0,0	0,0	12,06	38,56	3,13	0,0	0,01	2,67	11,89	4
6,40	4,30	0,0	0,0	14,26	31,04	7,450	0,1	0,0	03,34	20,10	10,67	0,0	0,03	0,39	3,22	5
5,92	2,21	0,0	0,0	12,18	28,78	4,364	0,1	0,1	07,10	22,84	10,55	0,0	0,12	2,97	4,56	6
16,07	0,07	0,0	0,0	2,13	13,98	0,061	0,0	0,0	11,20	32,32	1,84	0,0	0,49	6,53	17,15	7
9,99	0,03	0,0	0,0	1,66	14,48	0,145	0,0	0,0	22,36	33,03	2,80	0,0	0,27	3,86	13,86	8
8,22	0,10	0,0	0,0	2,51	20,25	0,194	0,0	0,0	17,69	30,38	2,72	0,0	0,12	5,34	18,01	9

С их помощью проведена количественная оценка структуры микрорельефов рабочих поверхностей металла по мере износа при эксплуатации детали. Изучено изменение процентного содержания групп условных цветов, по мере протекания процесса трения (табл. 3). Установлено, что в процессе трения, происходит циклическое изменение неоднородности структуры, что может быть объяснено отшелушиванием оторвавшихся при трении кристаллических частиц покрытия. В начальный период трения наблюдается значительное количество структур с высокой концентрацией углерода ~ 32 %, образуются наноалмазы (табл. 4, цвета группы 6). Далее в течение эксплуатации, по мере увеличения износа в процессе шелушения, происходит уменьшение таких структур ~ в 2,3 раза (до 14 %), наноалмазы отрываются от поверхности. Далее процесс циклически повторяется до полного разрушения покрытия.

Поскольку износ поверхности носит неоднородный характер, определены средние значения условного цвета для каждой фотографии (рис. 6, 7). Из расчета видно, что в начальный период процесса износа (гистограммы б - д, рис. 7) наблюдается циклическое изменение среднего условного цвета, затем, начиная с 5-ой фотографии (гистограмма д, рис. 7), происходит монотонное увеличение, а затем, начиная с 7-й (гистограмма з, рис. 7) – износ происходит более равномерно.



**Рис. 6 – Изменение усредненного условного цвета на каждой фотографии, характеризующей интенсивность износа поверхности в процессе трения**

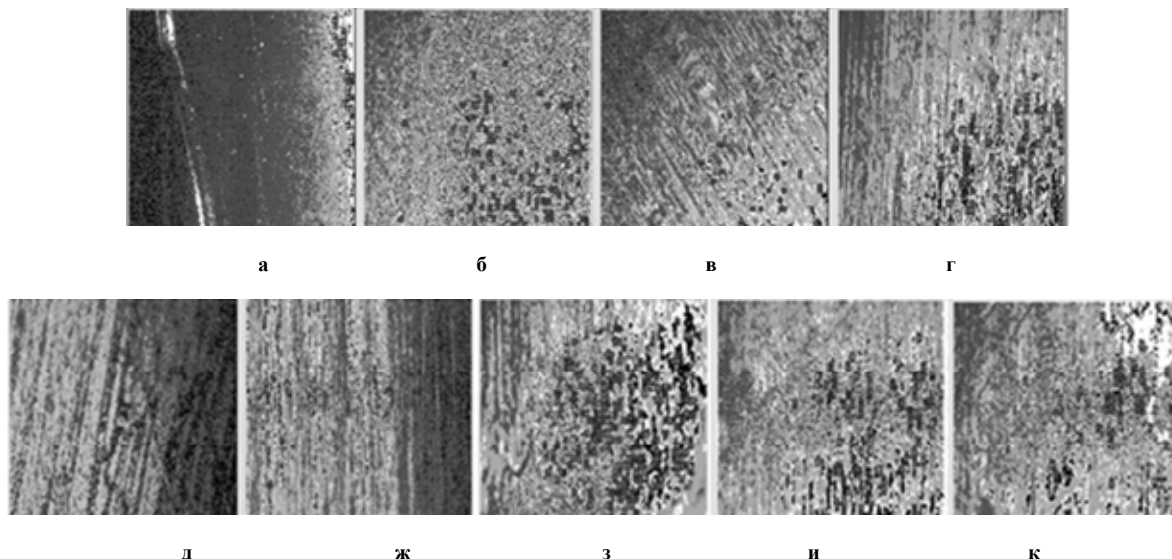
Для более полного исследования проанализировано распределение структур отрыва частиц покрытия в процессе трения на поверхности образцов. Для этого количественно определено процентное содержание условных цветов, характеризующих данные структуры (табл. 5) и построены гистограммы распределения их по поверхности (рис. 7) при 20 % содержании на фрагменте 10 × 10 пикселей.

В начале эксплуатации наблюдается резкое нарастание структур с отрывом частиц пленочного покрытия в процессе трения (гистограмма г, рис. 7), резкое уменьшение в середине эксплуатации (гистограммы д, ж, рис. 7), затем сильное увеличение (гистограмма з, рис. 7) и последующее уменьшение их числа (гистограммы и, к, рис. 7), связанное с отшелушиванием с поверхности. То есть наблюдается циклический, усталостный характер износа поверхности.

С увеличением доли отделившихся частиц возрастает количество участков темного цвета, т.е. проявляются аморфные зоны подслоя (гистограммы д, ж, рис. 7).

**Гистограммы интегрального распределения структур  
отрыва на фрагменте 10 × 10 пикселей**

№ фотографии	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Обозначение гистограммы	а	б	в	г	д	ж	з	и	к	
Количество структур отрыва, % при их доле, %	10	5,6	27,4	5,7	18,5	0	4,9	35,6	29,1	20,8
	20	1,1	6,2	1	5,9	0	0,2	12,2	6,6	4,4



**Рис. 7 – Гистограммы распределения структур отрыва частиц покрытия по поверхности, ограниченные их 20 % содержанием на фрагменте 10 × 10 пикселей**

### Выводы

В результате комплексных исследований определены состав покрытия (W-Co-C) аморфного типа, выявлена кинетика структурных изменений на поверхности трения.

Установлено, что износ таких покрытий в начальный период трения довольно неоднородный и сопровождается локальным изменением толщины покрытия. В процессе трения формируются кристаллические структуры, которые выкрошиваются по мере нарастания усталостных процессов. Такое аморфное покрытие с элементами кристаллических фаз, по всей вероятности, обеспечивает снижение коэффициента трения при эксплуатации.

При восстановлении таких деталей необходимо разработать технологию снятия остатков покрытия и предложить процесс нанесения покрытия с нанодобавками, который обеспечит аналогичную их износостойкость.

### Литература

1. Гусев А.И., Рампель А.А. Нанокристаллические материалы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 224 с.
2. Скобло Т.С. Применение компьютерного анализа металлографических изображений при исследовании структуры высокохромистого чугуна /Т.С.Скобло, О.Ю. Ключко, Е.Л. Белкин //Заводская лаборатория. Диагностика материалов.–2012.–№ 6 (78).–С.35-42.
3. Скобло Т.С. Особенности износа ножей для переработки сахарной свеклы /Т.С.Скобло, О.Ю. Ключко, Е.Л. Белкин [и др.] //Сб. трудов Междун. научно-практич. конф., посвящ. 70-летию ЮКГУ им. М.Ауэзова. – Казахстан, Шымкент, 2013. – С.185-197.
4. Скобло Т.С. Обоснование применения понятий уравнений гидродинамики Навье-Стокса для анализа металлографических изображений. /Т.С.Скобло, Е.Л.Белкин, О.Ю.Ключко //Materiały VII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji.- Przemysł: 2011. - URL: [http://www.rusnauka.com/12\\_ENXXI\\_2011/Tecnic/8\\_85541.doc.htm](http://www.rusnauka.com/12_ENXXI_2011/Tecnic/8_85541.doc.htm).

Поступила в редакцию 28.11.2013

---

Skoblo T.S., Sidashenko A.I., Plugatarev A.V., Klochko O.Yu, Belkin E.L., Ivaschenko V.N. **The features of modern diesel engines fuel equipment wear.**

Within the framework of the complex research the characteristic of wear are studied and kinetics of structural changes of the detail friction surface having the cover of amorphous type with nano-inclusions (W-Co-C).

It has been determined that the wear of such covers is rather inhomogeneous at the initial period. It is accompanied with the local changes in cover thickness. In the process of friction the crystal structures form; they scale off with increment of the endurance process. Such amorphous cover with inclusions of crystal phases apparently causes the decrease of friction coefficient during the exploitation. When providing the recovery of these details it is necessary to work out a technology of cover remains removal and a process of application of nano-inclusion cover which provides the similar durability.

**Key words:** cover wear, amorphous structure, nanodiamonds, properties, methods for analyzing complex.

### References

1. Gusev A.I., Rampel A.A. Nanokristallicheskie materialy. M.:FIZMATLIT, 2001. p. 224.
2. Skoblo T.S., Klochko O.Yu., Belkin Ye.L. Primenenie kompjuternogo analiza metallograficheskikh izobrazhenij pri issledovanii struktury vysokohromistogo chuguna. Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. 2012. № 6 (78). PP.35-42.
3. Skoblo T.S., Klochko O.Yu., Belkin Ye.L. [et al.] Osobennosti iznosa nozhej dlya pererabotki saharnoj svekly. Sb. trudov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konf., posvyashennoj 70-leyiyu YuKGU im. A.Auezova. Kazakhstan, Shymkent, 2013. PP.185-197.
4. Skoblo T.S., Belkin Ye.L., Klochko O.Yu. Obosnovanie primenenij ponyatij uravnenij gidrodinamiki Navje-Stocksa dlya analiza mettalograficheskikh izobrazhenij. Materiały VII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji. Przemysł: 2011. URL: [http://www.rusnauka.com/12\\_ENXXI\\_2011/Tecnic/8\\_85541.doc.htm](http://www.rusnauka.com/12_ENXXI_2011/Tecnic/8_85541.doc.htm).