the separation of oil-containing products of technological equipment cleaning) / V.P. Kovalenko, E.A. Ulyukina, A.N. Zotov // Refining and Petrochemicals. 2014. № 3. Pp. 42–46.

3. Kovalenko V.P. Ochistka neftesoderzhashchikh vod v dinamicheskom bake-otstoynike (Oily water treatment in a dynamic tank) / V.P. Kovalenko, E.A. Ulyukina, A.N. Zotov // Herald of FSEI HPE «Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin». Agroengineering. Economy and Production Organization of Agriculture. 2014. $N_{\rm D}$ 2 (62). Pp. 15–19.

4. Metodika izmereniy massovoy kontsentratsii nefteproduktov v probakh prirodnykh, piť evykh, stoch-

nykh vod fluorimetricheskim metodom (The methodolody of measuring mass concentration of oil products in samples of natural, potable, wastewater with a fluorimetric method). M: FTsAO, 2012. 25 p.

5. Kovalenko V.P. Utilizatsiya neftesoderzhashchikh produktov zachistki rezervuarov i tekhnologicheskogo oborudovaniya (Recycling of oil products of tank cleaning and processing equipment) / V.P. Kovalenko, E.A. Ulyukina, A.N. Zotov, I.A. Kuvichka // Proceedings of the First St. Petersburg International Forum «Innovative technologies in the field of production and application of fuels and lubricants». SPb. 2013. Pp. 382–388.

Vsevolod P. Kovalenko – PhD (Eng), Professor, Department of Road Transport, Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Moscow, Timiryazevskaya ul., 49; tel.: 8-903-752-89-55.

Elena A. Ulyukina – PhD (Eng), Professor, Head of Engineering Chemistry Department, Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev; Moscow, Timiryazev-skaya ul., 49; tel.: 8-910-430-59-10; e-mail: elenaulykina@rambler.ru.

Madina A. Lipayeva – senior researcher, FAI «25th State Research Institute of Applied Chemistry of the Russian Ministry of Defense», Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev; Moscow, Molodogvardeyskaya ul., 10; tel.: 8-910-472-49-54; e-mail: lipaeva_m51@mail.ru.

Received 25 June 2015

УДК 621.91.01

Т.С. СКОБЛО, О.Ю. КЛОЧКО, Е.Л. БЕЛКИН

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СПЛАВОВ МАТЕМАТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Проведены комплексная оценка высокохромистого чугуна (16...18%Cr) с разработкой аналитического аппарата, основанного на комплексном компьютерном анализе металлографических изображений, получено подтверждение эффективности метода исследованиями фазового состава путем совмещения с данными микрорентгеноспектрального, рентгеноструктурного анализа. Методика компьютерного исследования основана на гидродинамических аналогиях, с применением уравнений Навье-Стокса и оценкой формируемых фаз (диффузионный процесс, изменение плотности). Данный метод позволяет производить более глубокий анализ металлографических изображений, оценивать состав фаз и их долю, которые формируются на различных этапах получения изделия в процессе кристаллизации при отливке и термообработке. Аналитическими методами определен структурный состав исследуемого сплава, включающий в себя все фазы, формирующиеся на различных этапах получения изделия в процессе кристаллизации при отливке и термообработке. Кроме того, определена структурная неоднородность выявленных фаз. Корреляционный анализ показал наличие сильных связей между карбидными фазами и ферритом, а также между различными карбидными фазами и ферритом, отличающимся степенью легированности, что дало возможность ввести понятие базисов. Введение этого понятия дает возможность характеризовать фрагменты структур сочетанием фаз в базисе и с достаточно высокой степенью точности делать заключение о сочетаниях фаз и их дисперсности в литом состоянии и после термообработки. Данная методика может быть использована при построении диаграмм состояния многофазных сплавов, а также для идентификации выделяющихся фаз при дисперсионном твердении легированных сплавов.

Ключевые слова: высокохромистый сплав, компьютерный анализ, металлографические изображения, корреляционная модель, структурная неоднородность, базис.

Высокохромистые чугуны находят применение при изготовлении деталей в металлургическом и сельскохозяйственном машиностроении, поскольку этот материал отличается высокими показателями износо- и коррозионностойкости. Вместе с тем свойства такого материала достаточно не изучены. Основными фазами высокохромистых чугунов являются карбиды различных типов, аустенит и продукты его распада. Распад остаточного аустенита определяется уровнем его стабильности, который зависит от степени легированности сплава. Наиболее эффективной для уменьшения структурной неоднородности и трещинообразования упрочняющей обработкой для рабочего слоя массивных отливок с рабочим слоем из высокохромистого чугуна является низкотемпературный циклический отжиг с формированием ферритокарбидной структуры [1]. Одним из основных источников информации о свойствах металлов и сплавов служат металлографические изображения. Разработанные программы оценки структурных составляющих на базе действующих стандартов не относятся к высоколегированным дисперсионно-твердеющим сплавам. Известные программы направлены на оценку карбидов и феррита, выделяющихся при дисперсионном твердении, однако не учитывают их отличающийся химический состав, поскольку часть этих фаз выделяется при кристаллизации, а часть - после специальной термообработки, обеспечивающей наиболее полный распад остаточного аустенита.

Цель исследований

Целью настоящей работы является исследование структуры высокохромистого чугуна (16...18% Сг) на основе комплексного компьютерного анализа металлографических изображений с использованием элементов численного гидродинамического анализа, основанного на уравнениях Навье–Стокса [2], позволяющего оценивать состав фаз и их долю, которые формируются на различных этапах получения изделия в процессе кристаллизации при отливке и термообработке.

Материалы и методы исследований

Предложенная методика компьютерного исследования основана на гидродинамических аналогиях, происходящих при формировании фаз (диффузионный перенос, изменение плотности). Объектом исследования служили образцы высокохромистого чугуна, отобранные от рабочего слоя двухслойных высоколегированных чугунных массивных отливок, содержащих: 2,68...2,90% С и 16,0...17,1% Сг. Образцы чугуна подвергали низкотемпературной термической обработке.

Микроструктуру образцов в литом и термообработанном виде изучали с помощью металлографического, микрорентгеноспектрального и рентгеноструктурного анализов. Основные исследования по обобщениям структуры проводили при оптическом увеличении до 200 крат. Однако при таком увеличении не представляется возможным конкретизировать состав фаз. Установлено, что микроструктура высокохромистого чугуна представлена аустенито-хромистокарбидной эвтектикой со специальными карбидами хрома Me₇C₃ (47,8% Cr; 48% Fe) и многофазной системой продуктов распада аустенита. Продукты распада аустенита (рис. 1) включают в себя специальные карбиды, отличающиеся дисперсностью и химическим составом Ме₇C₃ (41...45% Cr; 48...52% Fe); Me₂₃C₆ (46...47% Cr; 46...51% Fe), что характеризует этапы термообработки, при которых выделились эти карбиды. Карбиды разной степени легированности и содержания углерода, главным образом, выделяются при термообработке у границ зерен. Это связано с тем, что у границ зерен понижена концентрация С и Сr, поэтому карбиды цементитного типа в таком чугуне содержат 11...14% Cr; до 79...83% Fe и различную долю углерода. Уже в процессе кристаллизации отливки частично происходит дисперсионное твердение. С учетом особенностей микроструктуры исследуемого высоколегированного сплава, только большие увеличения (10000...20000 крат) позволяют конкретизировать состав выделяющихся зерен, идентифицировать включения карбидной фазы в области распавшегося аустенита, т.к. при малом увеличении захватывается часть ферритной фазы, граничашей с ними. Большие увеличения позволили идентифицировать эти карбиды. Все спецкарбиды имеют огранку, тогда как легированные карбиды цементитного типа такой огранки не имеют.

Результаты исследований

Компьютером обработаны 49 полученных в формате bmp-изображений микроструктур высокохромистого чугуна в литом и термообработанном состоянии. Оцифровка этих изображений производилась в формат pgm (256 оттенков серого цвета от 0 до 255) по специально разработанной программе. Как показал анализ, абсолютно все файлы в формате pgm состояли всего из 11 цветов: 0, 8, 9, 73, 82, 92, 155, 164, 246, 247, 255, которым в дальнейшем для сокращения записей присвоены порядковые номера от 1 до 11. Такой эффект объясняется особенностями обрабатывающей аппаратуры и разработанного алгоритма. В таблице 1 приводятся процентные соотношения цветов на изображениях микроструктур в литом и термообработанном состоянии.

Структура матрицы сплава и гистограмма распределения цветов на изображениях микроструктур, согласно таблице 1, представлены на рисунках 1, 2.

Проанализированы рассчитанные гистограммы интегрального распределения цвета и данные, полученные экспериментально для каждой структуры. Путем сопоставления результатов исследований, представилось возможным разбить выявленные в результате компьютерного анализа цвета на три группы: 1...6 – карбиды, 7 – аустенит, 8...11 – феррит.

Так, установлено, что в литом состоянии доля остаточного аустенита в исследуемом сплаве находится в пределах 10...15%. В результате проведенной термообработки его количество уменьшилось на 5...10%, что согласуется с данными, приведенными в таблице 1. Выявлено, что его процентное содержание незначительно (до 5%) завышено при расчетах по сравнению с данными рентгеноструктурного анализа (ошибка последнего также возможна). Большое количество цветов, как для группы карбидов, так и для группы феррита можно объяснить химической неоднородностью исследуемо-го сплава.

При проведении математического анализа изображений исследуемых микроструктур было выявлено наличие сильной корреляции между определенными цветами пикселей изображения, отражающими зависимости между фазами исследуемого сплава. Была проведена оценка этих зависимостей посредством построения моделей линейной множественной регрессии. Обработку производили для гистограмм интегрального распределения цвета всех исследуемых микроструктур. Была получена таблица из 49 строк, аналогичная таблице 1. Из этих данных методом перебора выбирали отдельные столбцы и составляли массивы из 49 строк, но из меньшего количества столбцов. Полученные столбцы рассчитывали методом наименьших квадратов. При этом в качестве фактора c(k) принимали процентное содержание каждого выявленного цвета и обозначали одинаково с номером соответствующего цвета: от 1 до 11. В результате были получены

уравнения линейной модели $c_{k+1} = b + \sum_{i=1}^{\kappa} a_i c_i$ (при

проведении 1-, 2-, 3- и 4-факторного корреляционного анализа).

В результате однофакторного корреляционного анализа путем перебора найдены 9 вариантов линейной модели (табл. 2), для которых коэффициент корреляции составляет не меньше 0,7. Например, наиболее значимым фактором в рассмотренном анализе является карбид с цветом 2 и больше все-

Таблица 1

№ микро- структур	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Состояние сплава
1	0,1	20,5	5,9	4,0	19,3	5,7	6,6	16,5	5,4	14,1	1,7	Литое
2	3,3	21,3	7,0	6,0	10,7	6,4	7,0	15,8	7,2	12,9	2,0	Термообработанное
3	0,0	20,0	4,4	0,4	7,2	8,3	10,8	26,2	3,1	18,3	1,0	Литое
4	4,5	19,4	7,8	10,0	12,6	5,3	4,9	10,7	10,4	9,8	4,2	Термообработанное
5	0,0	4,4	2,4	0,7	17,4	22,9	21,4	21,0	3,6	4,2	1,5	Литое
6	7,6	18,4	6,5	11,3	12,9	5,5	5,4	12,0	7,2	10,5	2,3	Термообработанное
7	0,1	5,2	2,1	0,9	12,7	16,7	20,2	29,4	3,0	8,3	1,1	Литое
8	0,7	14,3	5,5	6,1	13,2	8,2	9,6	20,6	6,8	13,2	1,5	Термообработанное
9	0,0	21,7	4,4	0,1	4,2	7,1	10,9	27,8	2,8	19,9	0,9	Литое
10	0,4	26,3	9,7	1,7	5,3	4,4	5,8	15,6	11,7	14,6	4,1	Термообработанное
11	0,1	23,3	5,0	0,2	5,3	7,0	9,4	25,1	3,7	19,7	1,1	Литое
12	1,4	21,6	7,6	4,4	8,3	5,3	6,4	15,7	10,2	13,4	5,4	Термообработанное

Таблица процентного соотношения цветов, определенных для каждого изображения

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК :



Рис. 1. Микроструктура продуктов распада аустенита – центр распавшегося зерна (микроструктуры 11, 12 – табл. 1): а – в литом состоянии; б – после низкотемпературной термообработки (×15000)



Рис. 2. Гистограмма распределения цветов на изображении микроструктуры продуктов распада аустенита в литом и термообработанном состоянии (микроструктуры 11, 12 – табл. 1) го связан с аустенитом цвета 7 (фактор 3 соответствует цвету 2, функция 9 – цвету 7). Значимость и коэффициент корреляции резко выделяются от остальных линейных моделей.

Факторы разбиты на 6 групп так, чтобы в одной и той же группе был первый фактор (содержание выявленного цвета, %). Путем перебора найдены пары цветов, для которых коэффициент корреляции в уравнениях регрессии для остальных 9 – был не меньше 0,5. Таких вариантов пар цветов оказалось 4. Здесь и далее эти пары (в дальнейшем тройки и четверки цветов) назовем базисом. Под выражением минимальный коэффициент корреляции понимаем в приведенной далее таблице 3 тот из 9 цветов, для которого уравнение регрессии имело минимальный коэффициент корреляции. Как правило, min коэффициенту корреляции отвечал боль-

Таблица 2

Наиболее значимые парные связи между соотношением фаз

№ первого фактора с(1)	№ функции c(2)	Свободный член b уравнения	Коэффициент а ₁ уравнения	Коэффициент корреляции	Значимость фактора
1	4	1,118	1,277	0,840	3,390
2	3	-1,370	0,325	0,802	2,800
2	7	18,041	-0,440	0,732	2,153
3	7	14,844	-1,049	0,706	1,996
3	8	35,842	-2,448	0,792	2,682
3	9	-0,791	1,111	0,914	6,071
5	10	22,705	-0,769	0,720	2,077
8	9	11,876	-0,311	0,790	2,657
9	11	0,312	0,421	0,714	2,039

34

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК =

			, , , ,	•	
№ базиса	№ 1-го цвета базиса	№ 2-го цвета базиса	min коэффициент корреляции	max коэффициент корреляции	Примечание
1	2	8	0,535	0,921	Входит в 4-компонентный
2	3	8	0,561	0,920	Отдельный базис
3	6	10	0,549	0,729	Отдельный базис
4	7	10	0,514	0,880	Входит в 3- и 4-компонентный

Двухкомпонентные базисы цветов

шей частью цвет номер 11 (самый белый – феррит без легирующих добавок и с минимальной долей углерода), иногда цвет номер 1 (самый черный – карбидная фаза Fe_3C). Для примера поясним, какие цвета описывает первый базис этой таблицы. Если в него входят цвета с номерами 2 и 8, то он описывает цвета 1, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10 и 11.

Аналогично путем перебора найдены 4 трехкомпонентных базиса, для которых коэффициент корреляции для остальных 8 цветов составлял не меньше 0,7. Из определенных базисов только один имеет с двухкомпонентным базисом общие элементы 7 и 10. Следовательно, цвета 7 и 10 являются основными.

В 4-факторном корреляционном анализе путем перебора найдены 4-компонентные базисы, для которых коэффициент корреляции для остальных 7 цветов составляет не меньше 0,8 (чем больше компонентность базиса, тем, коэффициент корреляции будет выше). Таких базисов оказалось 13. Причем 5-й цвет не входит ни в один из базисов, ни с каким цветом тесно не связан, а только хорошо описывается через компоненты базиса. Интересно, что 13 получили за счет того, что во все базисы меньших размерностей добавился максимально белый цвет 11.

Получены изображения каждого базиса для обработанных изображений. На экран выдавался цвет каждого пикселя, который принадлежал рассматриваемому базису. Полученные изображения повторяли изображение микроструктуры и указывали расположение выявленных базисов.

Аналитически определяли наиболее подходящий 4-компонентный базис для каждого фрагмента размером 25×25 пикселей. Для фрагментов рассчитывали остаточные дисперсии по 13 приведенным в таблице 4 базисам. Тот базис, для которого такое суммарное отклонение минимально, принимали в качестве номера фрагмента. При этом для каждого фрагмента изображения можно рассчитать суммарное количество каждой фазы.

Для исследования изменения распределения базисов в результате термической обработки (содержание каждого базиса, %), направленной на распад остаточного аустенита [1], рассчитаны гистограммы распределения 4-компонентных базисов формируемых микроструктур (рис. 3).

Таблица 3



Рис. 3. Гистограмма распределения базисов на изображении микроструктуры продуктов распада аустенита в литом состоянии и после термообработки

В литом состоянии и после термообработки распределение базисов заметно изменяется. Например, для микроструктур 1 и 2 (рис. 3) после термообработки число фрагментов с базисом 6 и 11 резко уменьшается, а число фрагментов с базисами 4, 10, 13 увеличивается, что показывает изменение соотношения всех выделившихся фаз исследуемых микроструктур в результате проведенной термообработки. При этом значительно возрастает число фрагментов с карбидами цвета № 4, а также число сочетаний других выделившихся фаз, на основании чего можно сделать вывод об уменьшении дисперсности структуры.

Выводы

 Разработаны методы компьютерного исследования для количественной и качественной оценки фазового состава высокохромистого сплава. Аналитическими методами определен структурный состав исследуемого сплава, включающий в себя все фазы, формирующиеся на различных этапах полуТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК =

чения изделия в процессе кристаллизации при отливке и термообработке. Кроме того, определена структурная неоднородность выявленных фаз.

2. Корреляционный анализ показал наличие сильных связей между карбидными фазами и ферритом, а также между различными карбидными фазами и ферритом, отличающимся степенью легированности, что дало возможность ввести понятие базисов. Введение этого понятия дает возможность характеризовать фрагменты структур сочетанием фаз в базисе и с достаточно высокой степенью точности делать заключение о сочетаниях фаз и их дисперсности в литом состоянии и после термообработки.

3. Данная методика может быть использована при построении диаграмм состояния многофазных

сплавов, а также для идентификации выделяющихся фаз при дисперсионном твердении легированных сплавов.

Библиографический список

1. Скобло Т.С. Разработка технологии термообработки двухслойных прокатных валков из легированных чугунов / Т.С. Скобло, О.Ю. Клочко, А.И. Сидашенко и др. // Сталь. № 9. 2013. С. 77–80.

2. Скобло Т.С. Обоснование применения понятий уравнений гидродинамики Навье-Стокса для анализа металлографических изображений / Т.С. Скобло, Е.Л. Белкин, О.Ю. Клочко // http: //www.rusnauka.com/ 12_ENXXI_2011/ Tecnic /8 85541.doc.htm.

Скобло Тамара Семеновна – доктор технических наук, профессор кафедры технологических систем ремонтного производства, Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко; 61002, Украина, г. Харьков, ул. Артема, 44; тел.: +38067-289-40-98, раб. тел.:+38057-732-98-544; e-mail: stamarasemenovna@mail.ru.

Клочко Оксана Юрьевна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии материалов, Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко; 61002, Украина, г. Харьков, ул. Артема, 44; тел.: +38067-584-95-45, p.+38057-716-41-53; e-mail: vklochko@yandex.ua.

Белкин Ефим Львович – инженер кафедры технологических систем ремонтного производства, Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко; 61002, Украина, г. Харьков, ул. Артема, 44; e-mail: fima_belkin@meta.ua.

Статья поступила 17.06.2015

STUDY OF HIGH ALLOY STRUCTURES USING MATHEMATICAL METHOD

T.S. SKOBLO, O.Y. KLOCHKO, E.L. BELKIN

Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petro Vasilenko

The authors have carried out integrated assessment of high-chromium cast iron (16...18% of Cr) with the development of analytical apparatus based on a complex computer analysis of metallographic images. The results obtained confirm the effectiveness of phase investigation method by overlapping the data with those obtained with an electron-probe test and X-ray analysis. The computer research technique is based on hydrodynamic analogy using the Navier-Stokes equation and the evaluation of the formed phases (diffusion process, density change). This considered method allows carrying out a deeper analysis of metallographic images, estimating the phase composition and their parts formation at different stages of the item production in process of crystallization during casting and heat treatment. The paper features analytical determination of a structural composition of the studied alloy comprising all the phases formed at various stages of the item production in process of crystallization during casting and heat treatment. Moreover, the structural inhomogeneity of identified phases is determined. Correlation analysis showed that there are strong links between the carbide phases and ferrite, as well as between carbide phases and ferrite with a different doping level, which made it possible to introduce the concept of bases. The introduction of this concept provides for the description of structure fragments using the combination of phases in the basis and allows drawing conclusions about the combinations of phases and their dispersion in a cast state and after heat treatment with a high degree of accuracy. This technique can be used for plotting the state diagrams of multiphase alloys as well as for identifying precipitating phases in disperse hardening of alloys.

Key words: high alloy, computer analysis, metallographic images, correlation model, structure inhomogeneity, basis.

36 =

References

1. Skoblo T.S. Razrabotka tekhnologii termoobrabotki dvukhsloynykh prokatnykh valkov iz legirovannykh chugunov (Development of heat treatment technology of two-ply rolls of alloyed cast iron) / T.S. Scoblo, O.Y. Klochko, A.I. Sidorenko et al. // Steel. № 9. 2013. Pp. 77–80. 2. Skoblo T.S. Obosnovanie primeneniya ponyatiy uravneniy gidrodinamiki Nav'e-Stoksa dlya analiza metallograficheskikh izobrazheniy (The rationale for the use of the hydrodynamics equations concepts, the Navier-Stokes equations for the analysis of metallographic images) / T.S. Scoblo, E.L. Belkin, O. Y. Klochko // http: //www.rusnauka.com/ 12_ENXXI_2011/ Tecnic /8 85541.doc.htm.

Tamara S. Skoblo – PhD (Eng), Professor, Department of Repair Production Technology Systems, Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petro Vasilenko; 61002, Ukraine, Kharkov, Artema ul., 44; tel.: +38067-289-40-98, +38057-732-98-544; e-mail: stamarasemenovna@mail.ru.

Oksana Yu. Klochko – PhD (Eng), Senior Lecturer, Materials Technology Department, Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petro Vasilenko; 61002, Ukraine, Kharkov, Artema ul., 44; tel.: +38067-584-95-45, +38057-716-41-53; e-mail: vklochko@yandex.ua.

Yefim L. Belkin – engineer, Department of Repair Production Technology Systems, Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petro Vasilenko; 61002, Ukraine, Kharkov, Artema ul., 44; e-mail: fima_belkin@meta.ua.

Received 17 June 2015

УДК 621.891:621.793.001.57-048.35

А.В. КОЛОМЕЙЧЕНКО, А.В. КОЗЛОВ

Орловский государственный аграрный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ПЭО-ПОКРЫТИЙ, МОДИФИЦИРОВАНЫХ НАНОПОРОШКОМ CuO

В статье приведены результаты исследований на изнашивание пар трения, содержащих покрытия, сформированных плазменно-электролитическим оксидированием с модифицированием упрочненного слоя нанопорошком оксида меди (СиО). Представлены экспериментальные данные по измерению коэффициента трения в испытуемых соединениях. Целью исследования является исследование применения модифицированных ПЭО-покрытий на деталях из алюминиевых сплавов для снижения изнашивания и, как следствие, повышение долговечности деталей машин. Разработали новый способ модифицирования ПЭО-покрытий. Выявили, что наибольшее снижение значения коэффициента трения произошло у пары трения «Сталь 40Х – ПЭО-покрытие со сквозной пористостью 12%, модифицированное СиО». Установили, что при использовании рекомендуемых составов электролитов для ПЭО и дугового электрофореза, режимов двухступенчатой обработки и состава раствора-носителя нанопорошка СиО износостойкость испытуемых подвижных соединений с ПЭО-покрытиями модифицированными частицами нанопорошка СиО в 1,5...2 раза выше, а коэффициент трения в 2 раза ниже, чем у аналогичных подвижных соединений без модифицирования упрочненного слоя, принятых за эталон сравнения. Доказали, что применение ПЭО-покрытий, модифицированных частицами нанопорошка СиО, позволяет повысить долговечность деталей подвижного соединения.

Ключевые слова: модифицирование, ПЭО-покрытие, частица, нанопорошок, оксид меди, коэффициент трения, износостойкость.