
**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ,
ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

УДК 631.3.004.67:621.35.035.4

**ВЛИЯНИЕ ПРОЧНОСТИ КОМПОНЕНТОВ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ НА ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**© 2021 г. Ю. Е. Кисель^{1,2}, И. Н. Кравченко^{3,*}, А. И. Купреенко¹, Ю. А. Кузнецов⁴,
М. Н. Ерофеев³, С. А. Величко⁵, О. В. Бармина³¹ *Брянский государственный аграрный университет, Брянск, Россия*² *Брянский государственный инженерно-технологический университет, Брянск, Россия*³ *Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия*⁴ *Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина, Орел, Россия*⁵ *Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск, Россия***e-mail: kravchenko-in71@yandex.ru*

Поступила в редакцию 17.02.2021 г.

После доработки 01.08.2021 г.

Принята к публикации 24.08.2021 г.

Предложены теоретические зависимости для определения оптимального объемного содержания наполнителя в износостойких дисперсно-упрочненных композитах, с точки зрения соотношения прочностных свойств их компонентов. Показано, что прочность и износостойкость композита определяется природой его компонентов, структурными параметрами, а также прочностью межфазных связей.

Ключевые слова: композиционные электрохимические покрытия, электролитические сплавы, структура, механические свойства, износостойкость, дисперсная фаза

DOI: 10.31857/S0235711921060110

Нанесение электролитического железа, сплавов и композитов на его основе является перспективным методом восстановления и упрочнения деталей машин [1]. Оно позволяет автоматизировать техпроцесс, получать покрытия с заданными свойствами без термического воздействия на деталь, получать поверхность в пределах допуска на размер и шероховатость. Введение в “чистое” электролитическое железо твердых дисперсных частиц (оксидов, боридов, карбидов) позволяет получить на поверхности деталей композит, обладающий в десятки раз повышенной прочностью и износостойкостью в сравнении с высоколегированными сталями и покрытиями, полученными другими способами [2–6].

В соответствии с классической теорией прочности, “лепестковой” теорией изнашивания Н.П. Су, термофлуктуационной теорией С.Н. Журкова и В.Р. Регеля, адгезионной Е. Арчарда и Е. Хорнбогена, энергетической Г. Флейшера и Г. Грегера трение и изнашивание электрохимических композитов обусловлено сочетанием свойств материалов основы (матрицы) и частиц наполнителя (дисперсной фазы), их поверхностной энергией, структурными особенностями и внешними условиями [7–10].

Высокую износостойкость композитов связывают с тем, что твердые частицы дисперсной фазы, выступая в процессе изнашивания из матрицы покрытия, становятся площадками контакта, которые при трении наиболее интенсивно нагружаются. В случае приложения распределенной по поверхности контакта нагрузки, напряжения в

приповерхностном слое матрицы композита существенно ниже, чем в приповерхностном слое твердых включений. Под нагрузкой одинаково деформируется как матрица, так и включения. Вместе с тем, поскольку модуль упругости матрицы значительно ниже, чем модуль упругости твердых включений, напряжения в поверхностном слое матрицы оказываются существенно меньшими [11].

Недостаточная изученность связей физико-механических свойств и структуры покрытий, формируемой электролизом, ограничивает практическое применение гальванических композитов.

Для устранения этих недостатков проведены исследования, **цель** которых заключается в изучении и сопоставлении структурных и прочностных свойств компонентов композита для определения их влияния на износостойкость материала.

Материалы и методы исследования. В качестве объекта исследования выступали образцы с износостойкими электрохимическими композиционными покрытиями на основе железа и его сплавов.

Для изучения влияния прочностных свойств матрицы на износостойкость композиционного материала были выбраны железоникелевые (как менее прочные) и железокобальтовые (как более прочные) покрытия, механические свойства которых изучены ранее [12, 13]. Для исследования влияния состава и прочности наполнителя на свойства композитов выбраны микропорошки электрокорунда белого промышленного изготовления (марок М14, М20).

Износостойкие композиционные покрытия наносили на образцы из стали 35 толщиной 0.5 ± 0.1 мм. Композиты на основе железоникелевого сплава получали из электролита следующего состава, кг/м³: $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ – 550–600; $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 80–90; $\text{Na}_2\text{H}_4\text{C}_4\text{O}_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – 1–1.5; при плотности тока 35–40 А/дм², рН = 0.7–1.0, температуре 313–318 К. Железокобальтовые композиты наносили из электролита следующего состава, кг/м³: $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ – 550–600; $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 90–100; $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$ – 80; при плотности тока 30–35 А/дм², рН = 0.7–1.0, температуре 313–318 К.

Электролит-суспензию готовили введением в электролиты микропорошков электрокорунда белого марок М14 и М20 (ГОСТ 3647-80). Содержание порошков изменяли в пределах 25–150 кг/м³.

При нанесении композиционных покрытий использовали специальную ванну (рис. 1). Конструкция ванны с выпуклым дном и перегородкой, отделяющей пропеллерную мешалку от зоны расположения электродов, позволяла создавать восходящий поток с равномерным распределением частиц во всем объеме электролита. Раствор подогревали и стабилизировали по температуре с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$ при помощи термостата. Кислотность контролировали ионометром ЭВ-74.

Электролиты готовили из реактивов квалификации “ХЧ” и “ЧДА”, которые корректировали по концентрации компонентов и рН добавлением соответствующих кислот и солей. Состав электролитов поддерживали в пределах ± 1 кг/м³ и контролировали с помощью количественного химического анализа по стандартным методикам. Анодное декапирование проводили в электролите: H_2SO_4 – 300–350 кг/м³; $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ – 20–22 кг/м³.

Исследования абразивной износостойкости проводили по схеме резиновый ролик-колодка в соответствии с ГОСТ 23.208-79. При этом условия работы трущейся пары следующие: $P = 44$ Н, $n = 60$ мин⁻¹. Взвешивание образцов проводили на аналитических весах ВЛР-200М с точностью до 5.0×10^{-8} кг.

Исследование микроструктуры покрытий проводили с помощью микроскопов МИМ-8, МБС-9. Объемное содержание частиц наполнителя в композиционном материале определяли стереометрическим анализом методом случайных секущих в комбинации с линейным методом [14, 15].

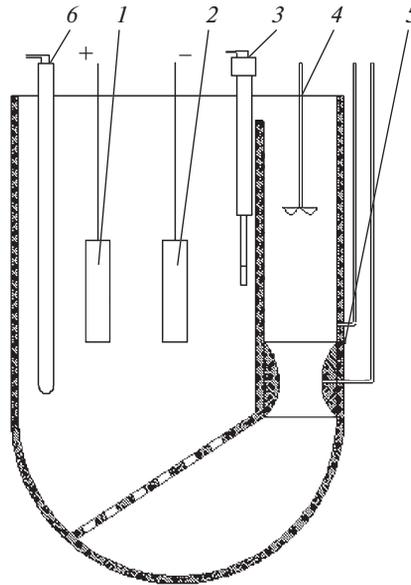


Рис. 1. Ванна с выпуклым дном и перфорированной перегородкой для нанесения покрытий: 1 – анод; 2 – катод; 3 – термометр; 4 – мешалка; 5 – расходомер Вентури; 6 – контактный нагреватель.

Опытные данные обрабатывали методами математической статистики. Для построения функциональных зависимостей использовали регрессионный анализ [16, 17].

Результаты исследований и их обсуждение. На этапе теоретических исследований определяли оптимальный состав композита в зависимости от размеров частиц наполнителя, их прочности и условий взаимосвязи между составляющими композита.

Рассматривая взаимосвязь структуры, прочности и износостойкости композита будем основываться на соотношениях дискретной и континуальной теорий дислокаций, уравнениях связи нормальных и тангенциальных напряжений и условиях прочности частиц дисперсного наполнителя на разрыв и отрыв [7].

Причинами разрушения композиционного материала будем считать: 1) нарушения адгезии между фазами по поверхности их раздела (по мере деформации пустоты растут и в момент, предшествующий разрушению, соединяются друг с другом); 2) растрескивание самих частиц, так как прочность и характер разрушения частиц зависят от их размера (с уменьшением размеров частиц их прочность растет и в идеале может достичь прочности материала на сдвиг).

Принимаем, что прочность частиц σ_p зависит от их размера в соответствии с соотношением Гриффитса–Орована [9]

$$\sigma_p^2 = \frac{8\gamma_p G_p}{(1 - \mu_p)d}, \quad (1)$$

где γ_p – удельная энергия разрушения частицы; G_p – модуль сдвига частицы; d – диаметр частиц; μ_p – коэффициент Пуассона включений.

Для определения прочности материала матрицы σ_m воспользуемся тем же соотношением, заменив размер частиц расстоянием между ними

$$\sigma_m^2 = \frac{8\gamma_m G_m}{(1 - \mu_m)\lambda}, \quad (2)$$

где γ_m – удельная энергия разрушения матрицы; G_m – модуль сдвига матрицы; λ – расстояние между частицами; μ_m – коэффициент Пуассона матрицы.

Частицы наполнителя более прочные, чем матрица композита, задерживают его разрушению, препятствуя распространению трещин. Рассмотрим явление в рамках дискретной и континуальной теорий, учитывая воздействие на препятствие как одно-стороннего, так и двухстороннего скопления дислокаций.

Среднее сдвиговое напряжение τ при одностороннем скоплении дислокаций [9]

$$\tau = \frac{Gb}{\pi(1 - \mu)d}, \quad (3)$$

где G , μ – соответственно модуль сдвига и коэффициент Пуассона материала; b – вектор Бюргерса; d – размер зерна материала.

Для двустороннего скопления дислокаций [9]

$$\tau = \frac{Gb}{(1 - \mu)d}. \quad (4)$$

Наибольший размер неразрушающихся частиц можно установить из равенства теоретической прочности частиц на разрыв и прочности по Гриффитсу–Оровану, зависящей от размеров

$$\sigma_p = \alpha_p \tau_p, \quad (5)$$

где α_p – коэффициент, зависящий от типа укладки частиц наполнителя в композите; τ_p – сдвиговое напряжение в частицах наполнителя.

Подставляя в формулу (3) выражение (5) с учетом того, что при хрупком разрушении частиц теоретическое значение энергии разрушения выражается соотношением

$$\gamma_p = G_p b_p / C_p, \quad (6)$$

где G_p , b_p – соответственно модуль сдвига и вектор Бюргерса; C_p – постоянная, зависящая от свойств материала наполнителя, получим соотношение для наибольшей прочности частиц

$$\sigma_p = \alpha_p b_p G_p / C_p. \quad (7)$$

Согласно дискретной теории для роста трещины в пределах одного зерна ($d_{pд}$) и для континуальной теории при эллиптической ($d_{pк}^3$) и цилиндрической ($d_{pк}^{II}$) формах трещин

$$d_{pд} = (2/\alpha_p^2) b_p C_p / (1 - \mu_p); \quad (8)$$

$$d_{pк}^3 = (4/\alpha_p^2) b_p C_p / (1 - \mu_p); \quad (9)$$

$$d_{pд}^{II} = (8/\pi\alpha_p^2) b_p C_p / (1 - \mu_p). \quad (10)$$

Минимальное расстояние между частицами, отвечающее наивысшей прочности определяется из условия теоретической прочности на сдвиг композиции в соответствии с уравнением (4)

$$\tau_p^2 = 1/(1 - \mu_p)(G_m b_m G_p)/(\pi\lambda C_p). \quad (11)$$

Подставляя значения величин для дискретной теории, получим критическое расстояние между частицами (λ_d)

$$\lambda_d = 1/(1 - \mu)(G_m b_m C_p)/(\pi G_p). \quad (12)$$

С помощью преобразования $\gamma = G_m b_m / C_m$ и $C_m \approx C_p$ – для матрицы выражение (12) примет вид

$$\lambda_d = 1/(1 - \mu)(\gamma_m / \gamma_p) b_p C_m / \pi. \quad (13)$$

Для континуальной теории прочности выражение для распределения критического расстояния между частицами (λ_k)

$$\lambda_k = 1/(1 - \mu)(\gamma_m / \gamma_p) b_p C_p. \quad (14)$$

Коэффициент концентрации напряжений в ДФ (K_p) можно определить по соотношению

$$K_p = \sigma_p / \sigma_k = \beta \lambda / d. \quad (15)$$

В идеальном случае наивысшая прочность композита может быть равна теоретической прочности частиц. Поэтому будет справедливо соотношение

$$\sigma_p / \sigma_k = \beta \lambda_k / d_k = 1, \quad \text{откуда} \quad \beta = d_k / \lambda_k.$$

Тогда коэффициент концентрации напряжений в дисперсных частицах при выражении λ через объемное содержание наполнителя в композите V будет

$$K_p = (\lambda / d_s)(d_k / \lambda_k) = (d_k / \lambda_k)(\sqrt{\pi/3V} - \sqrt{2/3}). \quad (16)$$

С учетом выражения (1) определим K_p композита через физические параметры компонентов фаз и объемного содержания наполнителя в композите:

– для дискретной теории

$$K_{pd} = (2\pi/a^2)(\gamma_p / \gamma_m)(\sqrt{\pi/3V} - \sqrt{2/3}); \quad (17)$$

– для континуальной теории (при прохождении через композит эллиптических трещин или петель дислокаций)

$$K_{pk}^2 = (2\pi/\alpha^2)(\gamma_p / \gamma_m)(\sqrt{\pi/3V} - \sqrt{2/3}), \quad (18)$$

и при прохождении цилиндрических трещин

$$K_{pk}^H = (8/\alpha^2)(\gamma_p / \gamma_m)(\sqrt{\pi/3V} - \sqrt{2/3}). \quad (19)$$

Коэффициент концентрации напряжений в матрице композиции (K_m) можно считать, используя известное правило смесей

$$K_m = (1 - VK_p)/(1 - V). \quad (20)$$

Выполним расчет содержания наполнителя в композите, отвечающего наивысшей прочности композиционного материала при его разрушении, когда трещина проходит через связующие и дисперсные частицы. Условием такого разрушения будет отношение

$$\sigma_p / \sigma_k = K_p = \beta \lambda_k / d_k \quad \text{или} \quad \sigma_p^2 / \sigma_k^2 = K_p^2 = (\beta \lambda_k / d_k)^2. \quad (21)$$

Так как расчет необходимо выполнить для всех случаев разрушения, рассмотрим его принципы на одном из вариантов, например, при применении к изучению прочности композита дискретной теории дислокаций и прохождения трещин внутри одного зерна.

Соотношение σ_p/σ_k для такого случая будет равно

$$\frac{\frac{2\gamma_p G_p}{(1-\mu)d_k}}{\alpha_p^2 \frac{G_m b_m G_p}{\pi(1-\mu)\lambda C_p}} = \frac{2\pi \lambda \gamma_p}{\alpha_p^2 d_p \gamma_m}. \quad (22)$$

Из соотношения (21) следует

$$\sigma_p^2/\sigma_k^2 = 4\lambda_k/(\pi d_k)^2 = \frac{2\pi \lambda \gamma_p}{\alpha_p^2 d_p \gamma_m}. \quad (23)$$

Выражение (22) позволяет определить отношение λ/d для искомого случая в виде

$$\frac{\lambda}{d_p} = \frac{\pi^3 \gamma_p}{8\alpha_p^2 \gamma_m}. \quad (24)$$

Учитывая зависимость объемного содержания от соотношения λ/d

$$\frac{\lambda}{d_p} = \alpha \sqrt{\frac{\pi}{3V} - \frac{2}{3}}, \quad (25)$$

можно получить выражение, связывающее объемное содержание с прочностными свойствами компонентов композита

$$\frac{\lambda}{d_p} = \frac{\pi^3 \gamma_p}{8\alpha_p^2 \gamma_m} = \sqrt{\frac{\pi}{3V} - \frac{2}{3}}. \quad (26)$$

Из выражения (25) получим объемное содержание наполнителя, отвечающее наивысшей прочности композита в рамках дискретной теории

$$V = \frac{\pi}{3 \left(\frac{\pi^3 \gamma_p}{8\alpha_p^2 \gamma_m} + \sqrt{\frac{2}{3}} \right)^2}. \quad (27)$$

Аналогичным образом получим соотношения при прохождении трещин через поликристаллы в рамках континуальной теории

$$V = \frac{\pi}{3 \left(\frac{\pi^3 \gamma_p}{\alpha_p^2 \gamma_m} + \sqrt{\frac{2}{3}} \right)^2}, \quad (28)$$

а также при рассмотрении континуальной теории для случаев двустороннего скопления дислокаций при движении эллиптических и цилиндрических трещин, соответственно

$$V = \frac{\pi}{3 \left(\frac{1 \gamma_p}{\alpha_p^2 \gamma_m} + \sqrt{\frac{2}{3}} \right)^2}, \quad (29)$$

$$V = \frac{\pi}{3 \left(\frac{8 \gamma_p}{\alpha_p^2 \gamma_m} + \sqrt{\frac{2}{3}} \right)^2}. \quad (30)$$

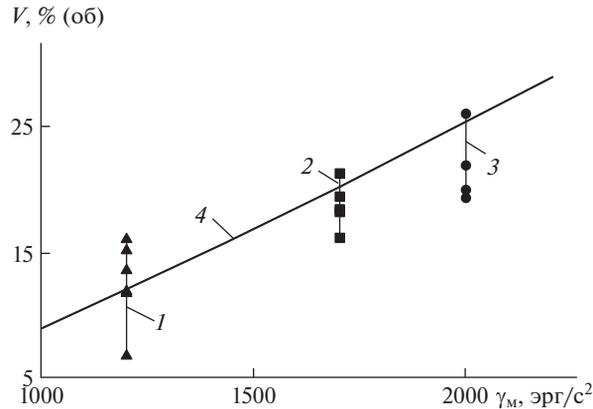


Рис. 2. Влияние прочности матрицы и прочности связи дисперсных частиц и матрицы на оптимальное объемное содержание наполнителя (электрокорунд белый) в электрохимических композитах на основе: 1 – меди; 2 – никеля; 3 – железа; 4 – по выражению (28).

Соотношения (28)–(30) предполагают наличие идеальной связи между частицами наполнителя и матрицей, которая может находиться в пределах $0 \leq \sigma_{p-m} \leq \sigma_p$. Ее действительное значение можно изменять, варьируя величиной γ_p/γ_m (для электролитического железа $\gamma_m^{(Fe)} = 2000$ эрг/см²; меди $\gamma_m^{(Cu)} = 1200$ эрг/см²; никеля $\gamma_m^{(Ni)} = 1700$ эрг/см²; электрокорунда $\gamma_p = 3600$ эрг/см²) [2, 4].

Результаты проверки полученных соотношений на примере композита железо-электрокорунд, никель-электрокорунд и медь-электрокорунд показали [18–24], что наиболее близки к действительным результаты расчета, основанные на континуальной теории, когда трещины моделируются как двухсторонние скопления дислокаций эллиптической формы. Соответственно объемное содержание, отвечающее наивысшей прочности покрытий по (28), в зависимости от прочностных свойств матрицы с включением электрокорунда, показано на рис. 2.

Следует заметить, что результаты теоретических и экспериментальных исследований достаточно хорошо согласуются (рис. 2). Таким образом, подтверждается возможность повышения износостойкости композитов с ростом прочности матрицы при введении в железо кобальта, никеля и других элементов.

Электроосаждаемые сплавы и композиты имеют более совершенную структуру (рис. 3), высокие упругопластические свойства, износостойкость, прочность сцепления с основой и меньшие внутренние напряжения в сравнении с “чистым” электролитическим железом [12, 18, 19, 21, 24].

Исследования абразивной износостойкости композитов на основе железа и его сплавов (железо-никель, железо-кобальт) показали, что их абразивный износ в значительной мере зависит от размеров и объемного содержания дисперсных частиц в материале (рис. 4).

Износ композита с ростом содержания наполнителя в покрытии уменьшался и проходил через минимум при содержании микропорошков 18–24% (об.). Необходимо отметить, что наибольшая износостойкость композитов на основе железокобальтовых покрытий оказалась выше при несколько большем объемном содержании наполнителя: $V \approx 22\text{--}24\%$ (об.), чем у композитов на железоникелевой основе $V \approx 18\text{--}20\%$ (об.).

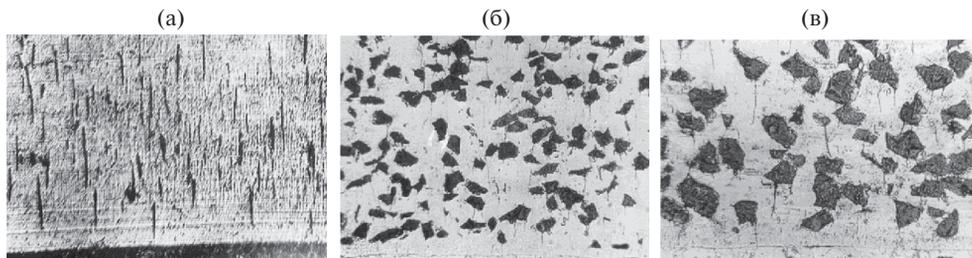


Рис. 3. Структура композита железо-никель электрокорунд белый ($\times 400$): (а) – без наполнителя; (б) – М10; (в) – М20.

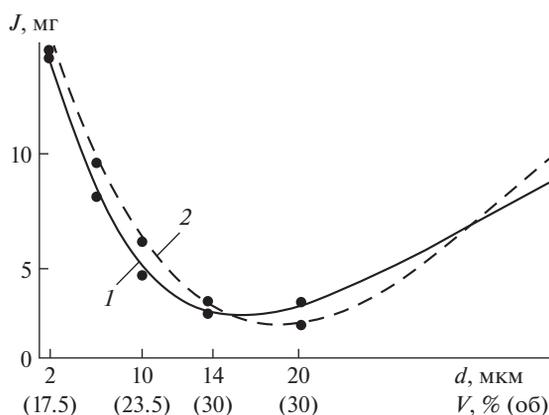


Рис. 4. Влияние размера (d) и содержания (V) наполнителя на износ композитов железо-никель (1) и железо-кобальт (2) электрокорунд белый.

Заключение. Теоретическим анализом структурно-прочностных свойств композиционных покрытий показано, что прочность гетерофазного материала определяется природой его компонентов, структурными параметрами, а также прочностью межфазных связей. Предложены расчетные формулы для определения оптимального объемного содержания наполнителя в износостойких композитах.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурьянов Г.В., Кисель Ю.Е. Износостойкие электрохимические сплавы и композиты на основе железа. Брянск, 2015. 98 с.
2. Вишняков Л.Р., Грудина Т.В., Кадыров В.Х. и др. Композиционные материалы: Справочник // Под общ. ред. Д.М. Карпиноса. Киев: Наукова думка, 1985. 592 с.
3. Антропов Л.И., Лебединский Ю.Н. Композиционные электрохимические покрытия и материалы. Киев: Техника, 1986. 95 с.
4. Бородин И.Н. Порошковая гальванотехника. М.: Машиностроение, 1990. 240 с.

5. *Целуйкин В.Н.* Трибологические свойства композиционных электрохимических покрытий на основе никеля // Трение и износ. 2010. Т. 31. № 5. С. 475.
6. *Кисель Ю.Е., Горьков А.С.* Оптимизация износостойкости композитов по их установившейся шероховатости // Вестник Брянского государственного технического университета. 2011. № 4 (32). С. 26.
7. *Айнбиндер С.Б.* Параметры шероховатости контртела, определяющие износостойкость полиэтилена // Трение и износ. 1981. Т. 2. № 1. С. 12.
8. *Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И.* Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение, 1982. 212 с.
9. *Мартин Д.У.* Микромеханизмы дисперсионного твердения сплавов // Пер. с англ. М.Ю. Матвеева. М.: Металлургия, 1983. 168 с.
10. *Крагельский И.В., Михин Н.М.* Узлы трения машин: Справочник. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.
11. *Kisel Y.E., Serpik I.N., Markaryants L.M., Bezik V.A., Guryanov G.V., Bezik D.A.* Calculation of the elastic Characteristics of Composite Materials with Dispersed Inclusions // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Т. 10. № 24. С. 44018.
12. *Кисель Ю.Е., Гурьянов Г.В.* Структура и некоторые прочностные свойства электролитических сплавов железа // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 7. С. 25.
13. *Кисель Ю.Е.* Повышение долговечности деталей сельскохозяйственной техники электротермической обработкой композиционных электрохимических покрытий: Дис. ... д-ра техн. наук. Брянск, 2014. 249 с.
14. *Салтыков С.А.* Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1976. 270 с.
15. *Домбровский Ю.М.* Стереология. М.: Ростов н/Д: Дон. гос. техн. ун-т, 2002. 101 с.
16. *Гмурман В.Е.* Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2003. 479 с.
17. *Юдин М.И.* Планирование эксперимента и обработка его результатов. Краснодар: КГАУ, 2004. 239 с.
18. *Сафонов В.В., Шишурин С.А., Сёмочкин В.С.* Наномодифицированные химические покрытия с улучшенными физико-механическими свойствами // Инновации в АПК: Проблемы и перспективы. 2014. № 3. С. 18.
19. *Серебровский В.В., Серебровский В.И., Сафонов Р.И., Гнездилова Ю.П., Калуцкий Е.С.* Электроосаждение железоборидных покрытий // Электрика. 2015. № 11. С. 33.
20. *Стекольников Н.Ю., Стекольников Ю.А., Максимов Д.И., Астанин В.К.* Восстановление изношенных изделий сельскохозяйственной техники гальваническим хромированием // Вестник Тамбов. гос. техн. ун-та. 2016. Т. 22. № 4. С. 679.
21. *Kisel J.E., Guryanov G.V.* Wear Resistance of Composite Coatings Based on Iron Alloys // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018. 450 032047.
22. *Degtyar L.A., Zhukova I.Y., Mishurov V.I.* Experience and perspectives of electrodeposition from electrolytes-colloids of nickel plating // Materials Science Forum. 2019. Т. 945. С. 682.
23. *Дегтярь Л.А., Иванина И.С., Жукова И.Ю.* Особенности формирования композитных электрохимических покрытий на основе никеля и наноструктурного диборида циркония // Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т. 19. № 1. С. 31.
24. *Belous N.M., Kisel Yu.E., Guryanov G.V., Markaryants L.M.* Enhancement of wear resistance of mulcher teeth with the help of electrochemical coats // E3S Web of Conferences 193, 01019 (2020) ICMTMTE 2020.