

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ / ELECTROTECHNOLOGIES AND ELECTRICAL EQUIPMENT IN AGRICULTURE

УДК 621.793

DOI: 10.15507/2658-4123.031.202103.430-448

Оригинальная статья



Оценка модуля упругости композитных гальванических покрытий при их послойном осаждении

С. Ю. Жачкин¹, А. И. Завражнов², Н. А. Пеньков³,
А. В. Мартынов^{4*}, Р. Н. Задорожний⁵

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (г. Воронеж, Российская Федерация)

²ФГБОУ ВО «Мичуринский ГАУ» (г. Мичуринск, Российская Федерация)

³ФГКВООУ ВО «ВУНЦ ВВС «ВВА»» (г. Воронеж, Российская Федерация)

⁴ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Российская Федерация)

⁵ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (г. Москва, Российская Федерация)

*martynov-230685@yandex.ru

Введение. Восстановление внутренних цилиндрических поверхностей деталей пар трения является наиболее трудоемким при поддержании автотракторной техники в исправном состоянии. Метод гальваноконтактного осаждения композитных покрытий, заключающийся в упруго-пластической деформации формируемых слоев, используется широко. Для его применения необходимо определить значения модуля упругости, от которых зависит износостойкость трибосопряжений.

Материалы и методы. Для исследования использовались образцы цилиндрической формы из сталей 30ХГСА и 30ХГСНА. Гальваническое осаждение покрытий проводилось в электролите, содержащем 200–250 г/л оксида хрома, 2,0–2,5 г/л серной кислоты, дистиллированную воду. При расчете напряженно-деформированного состояния использовался аппарат механики сплошных сред.

© Жачкин С. Ю., Завражнов А. И., Пеньков Н. А., Мартынов А. В., Задорожний Р. Н., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Результаты исследования. Определена зависимость податливости покрытия как функция параметров отдельных элементарных слоев. Доказано, что при нанесении многослойного покрытия трех видов (ортогонально-армированного, перекрестно-армированного и квазиизотропного) его структура не зависит от углов кинематического движения инструмента по внутренней цилиндрической поверхности детали. Для каждого отдельного вида покрытия указывается путь определения постоянных коэффициентов жесткости слоев. По значениям коэффициентов жесткости выведены зависимости для расчета модуля упругости наносимого материала.

Обсуждение и заключение. При определении модуля упругости многослойных композитных покрытий расчет произведен по отдельным слоям, переходя к сопутствующей системе координат, что полностью согласуется с точкой зрения Лагранжа на изучение движения сплошной среды. Полученные результаты имеют практическую значимость при выборе материала наносимого покрытия для восстановления внутренних цилиндрических поверхностей.

Ключевые слова: цилиндрическая поверхность, восстановление деталей, многослойное композитное покрытие, упруго-пластическая деформация, коэффициент жесткости, модуль упругости

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Оценка модуля упругости композитных гальванических покрытий при их послойном осаждении / С. Ю. Жачкин, А. И. Завражнов, Н. А. Пеньков [и др.]. – DOI [10.15507/2658-4123.031.202103.430-448](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.430-448) // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 3. – С. 430–448.

Original article

Estimation of the Elasticity Modulus of Composite Electroplated Coatings during Their Layer-by-Layer Deposition

S. Yu. Zhachkin^a, A. I. Zavrazhnov^b, N. A. Penkov^c,
A. V. Martynov^{d*}, R. N. Zadorozhny^e

^a*Voronezh State Technical University (Voronezh,
Russian Federation)*

^b*Michurinsk State Agrarian University (Michurinsk,
Russian Federation)*

^c*Military Educational and Scientific Centre of the Air Force
N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy
(Voronezh, Russian Federation)*

^d*National Research Mordovia State University (Saransk,
Russian Federation)*

^e*Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow,
Russian Federation)*

*martynov-230685@yandex.ru

Introduction. To keep automobiles and tractors in operation conditions, it is necessary to restore the inner cylindrical surfaces of the friction pair parts. This is the most labor-intensive activity. The method of electroplated contact deposition of composite coatings, based on elastic plastic deformation of formed layers, is used for repairing surfaces. To use this method it is necessary to determine the values of the elasticity modulus, on which the wear resistance of tribocouplings depends.

Materials and Methods. For the study, cylindrical samples made of 30 HGSA and 30 HGSNA steels were used. Electrolyte containing 200–250 g/l chromium oxide, 2.0–2.5 g/l sulfuric acid, and distilled water was used for electroplating the coatings. When calculating the stress-strain state, the apparatus of continuum mechanics was used.

Results. The dependence of the coating pliability as a function of the parameters of individual elementary layers is determined. When the multilayer coating of three types (orthogonal-reinforced, cross-reinforced and quasi-isotropic) is applied, its structure does not depend on the angles of kinematic tool movement on the inner cylindrical surface of the part. For each type of coatings, the way to determine the constant stiffness coefficients of the layers is specified. The dependences for calculating the elasticity modulus of the applied material are derived from the values of the stiffness coefficients.

Discussion and Conclusion. In determining the modulus of elasticity of multilayered composite coatings, the calculation is made for the individual layers by passing to the convective coordinates, which is in complete agreement with the Lagrange point of view on the study of the motion of a continuous medium. The results obtained are of practical significance in the selection of the coating material to be applied for the restoration of internal cylindrical surfaces.

Keywords: cylindrical surface, restoration of parts, multilayer composite coating, elastic-plastic deformation, stiffness coefficient, elasticity modulus

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Zhachkin S.Yu., Zavrzhnov A.I., Penkov N.A., et al. Estimation of the Elasticity Modulus of Composite Electroplated Coatings during Their Layer-by-Layer Deposition. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(3):430-448. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.430-448>

Введение

Предприятия технического сервиса, направленные на ремонт как отечественной, так и импортной автотракторной техники, становятся все более востребованными в современных условиях [1–3]. Известно, что наиболее трудоемко ремонтировать соединения деталей в системе вала, когда износ компенсируется за счет восстановления внутренней поверхности детали [4; 5].

В настоящее время для восстановления внутренних цилиндрических поверхностей применяется метод гальваники. Однако из-за утраты эффективных способов нанесения покрытий, разработанных в 1980-х гг., широкое применение находит способ гальваноконтактного осаждения композитных покрытий (ГКО) [6; 7].

У способа ГКО есть ряд достоинств. Во-первых, применение установки, которая позволяет наносить покрытия, не окуная деталь в ванну, благодаря равномерному обновлению электролита в пространстве инструмента и детали [8; 9]. Вторым отличием способа ГКО является то, что прижимная поверхность выполнена в виде сегментов, имеющих возможность свободного перемещения относительно базовой оси¹. Такая схема работы обеспечивает равномерность распределения частиц наполнителя по объему композитной матрицы и цилиндричность восстановленного отверстия по высоте детали².

В качестве инструмента можно использовать различные материалы с заданными физико-механическими свойствами, обеспечивающие контролируемый перенос инструмента

¹ Живогин А. А. Восстановление гильз цилиндров дизельных двигателей сельскохозяйственной техники композитным покрытием на основе железа: дис. ... канд. техн. наук. Мичуринск, 2014. 174 с.

² Ли Р. И. Технологии восстановления и упрочнения деталей автотракторной техники: учеб. пособие. Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2014. 379 с.

на поверхность детали в зависимости от степени его износа. Чаще всего в качестве материала инструмента применяется хром для получения износостойких и коррозионно-стойких покрытий [10; 11].

Нанесение гальванического покрытия способом ГКО происходит за счет периодической упруго-пластической деформации инструмента без дополнительной механической обработки.

В момент прохождения зоны механической активации обрабатываемой поверхности детали циклическое механическое воздействие инструмента на растущие кристаллы гальванического хрома приводит к временной остановке их роста. В этот момент формируется слой композитного покрытия. После выхода инструмента из обрабатываемой зоны здесь снова идет рост кристаллов хрома до следующего механического контакта с инструментом, что формирует последующий слой гальванического композитного покрытия. При периодических повторениях таких процессов ГКО особенностью роста композитного покрытия на восстанавливаемой цилиндрической поверхности детали является послойное нанесение композита [12].

При ремонте автотракторной техники с восстановлением деталей нанесением гальванических композитных покрытий необходимо знать получаемые физико-механические свойства для прогнозирования износостойкости трибосопряжений в заданных

условиях эксплуатации. Для их оценки должны быть известны технические постоянные, характеризующие связь напряжений и деформаций формируемых осадков, большинство из которых отсутствуют в технической литературе³. Одним из таких параметров является модуль упругости.

Цель исследования – определение модуля упругости многослойных композитных покрытий, нанесенных способом гальваноконтактного осаждения.

Обзор литературы

Анализ литературных источников показал, что справочные значения модуля упругости приводятся только для объемных материалов.

Для определения модуля упругости материалов покрытия в лабораторных условиях используется стандартная методика растяжения цилиндрических образцов на разрывной машине⁴. Результатом разрыва образцов является построение линейной зависимости между напряжением σ (до предела пропорциональности) и относительным удлинением ϵ , отношение которых дает значение модуля упругости. Однако данный метод связан с разрушением испытуемого материала и не позволяет определять значения модуля упругости отдельно для нанесенных металлопокрытий.

Приводится методика определения модуля упругости металлопокрытий инструментальным индентированием на универсальной испытательной

³ Оценка относительного удлинения покрытий, сформированных методом электроискровой обработки / С. А. Величко, П. В. Чумаков, Е. Г. Мартынова, М. Г. Тятюшкина // Материалы Международной научно-практической конференции «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы» (22 ноября 2018 года). Саранск, 2018. С. 377–381. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36800128> (дата обращения: 01.05.2021); Оценка условного предела текучести покрытий, сформированных методом электроискровой обработки / С. А. Величко, П. В. Чумаков, Е. Г. Мартынова, М. Г. Тятюшкина // Материалы Международной научно-практической конференции «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы» (22 ноября 2018 года). Саранск, 2018. С. 382–387. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36800129> (дата обращения: 01.05.2021).

⁴ ГОСТ Р 8.748–2011. Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материала при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний. М.: Стандартинформ, 2013.

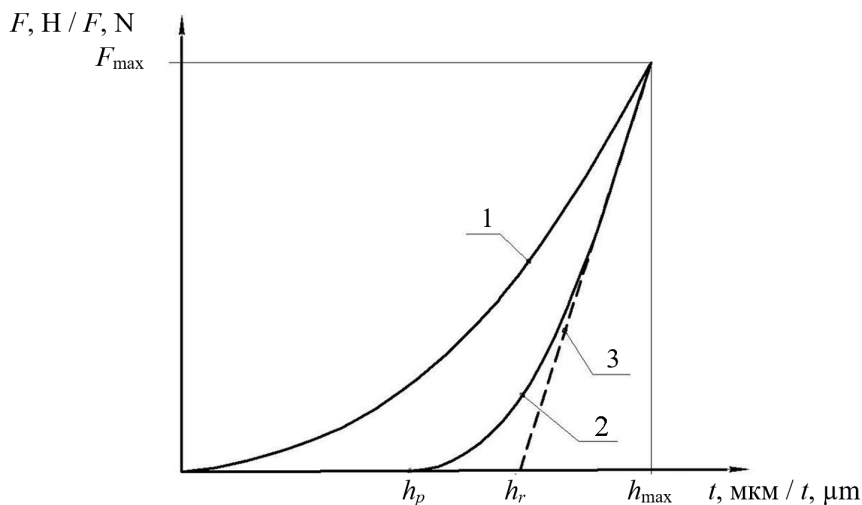
машине⁵ [13]. В результате приложенной нагрузки на индентор, который углубляется в испытываемую поверхность, машина строит кинетическую зависимость нагрузки от глубины индентирования при нагружении и разгрузении индентора (рис. 1).

По данной методике модуль упругости определяется по полученным значениям внедрения индентора на глубину h . Однако в анализируемой работе получены результаты только для объемных материалов без покрытия и с покрытием, нанесенным методом электроискровой обработки⁶. При этом требованием к испытываемой поверхности является плоскостность, а толщина нанесенного покрытия, при

которой показания машины становятся стабильными, должна быть более 0,1–0,2 мм.

В других работах модуль упругости определяется так же по ГОСТу Р 8.748–2011. Однако представленные результаты базируются на однофазных металлах и на единичных слоях, полученных электроосаждением композиционного материала никель-нанокарбонитрида хрома определенной толщины. Применить данную методику отдельно для многослойных покрытий невозможно [14; 15].

Один из распространенных способов оценки модуля упругости основан на измерении твердости поверхности (рис. 2) [16; 17].



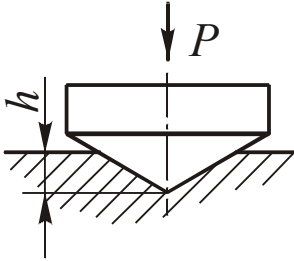
Р и с. 1. Зависимость нагрузки от глубины индентирования: 1 – кривая, соответствующая увеличению испытательной нагрузки (нагружение); 2 – кривая, соответствующая уменьшению испытательной нагрузки (разгружение); 3 – касательная к кривой 2⁷

Fig. 1. Dependence of the load on the depth of indentation: 1 – curve corresponding to an increase in the test load (loading); 2 – curve corresponding to a decrease in the test load (unloading); 3 – tangent to curve 2

⁵ Совершенствование методики определения модуля упругости материалов инструментальным индентированием / С. А. Величко, П. В. Чумаков, В. И. Иванов, Е. Г. Мартынова // Материалы Международной научно-практической конференции «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы» (25–26 ноября 2020 г.). Саранск, 2020. С. 335–341. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44318698> (дата обращения: 01.05.2021).

⁶ Там же.

⁷ ГОСТ Р 8.748–2011. Металлы и сплавы...



Р и с. 2. Схема измерения твердости поверхности: P – приложенная нагрузка; h – глубина вдавливания

F i g. 2. Surface hardness measurement scheme: P – applied load; h – indentation depth

По полученной твердости с использованием выведенных зависимостей определяется модуль упругости. Однако данная методика также применима для объемных материалов.

Методика вычисления модуля упругости с использованием средств тензометрии используется для объемных материалов [18].

Подводя краткий итог обзора литературы, стоит отметить, что возможность определять модуль упругости позволит применять аппарат механики сплошных сред для проведения расчетов деформационного состояния

многослойных композитных покрытий. Полученные результаты исследования с высокой достоверностью коррелируют с результатами других авторов, изучающих однослойные покрытия.

Материалы и методы

Для исследования использовались образцы цилиндрической формы из сталей 30ХГ2СА ТУ 14-1-950-74 и 30ХГ2СНА ТУ 14-1-950-74, широко применяемых для изготовления деталей автотракторной техники (рис. 3).

Наружный диаметр образцов составлял 22 мм, длина 45–50 мм. Они подвергались термообработке до предела прочности $\sigma_b = 1\ 200$ – $1\ 420$ МПа, внутренняя поверхность шлифовалась до шероховатости $R_a = 2,50$ – $1,25$ мкм, а затем детали проходили термическую обработку при температуре 210–230 °С для устранения наводороживания обрабатываемой поверхности [19–22].

Нанесение хромового покрытия осуществлялось с помощью электролита, содержащего 200–250 г/л оксида хрома, 2,0–2,5 г/л серной кислоты, дистиллированную воду [19; 20]. Для измерения плотности электролита использовался ареометр, а для

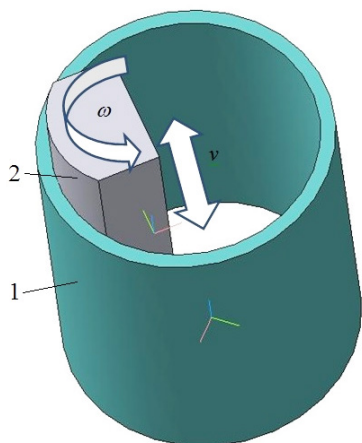


Р и с. 3. Образцы для нанесения покрытия гальваноконтактным осаждением

F i g. 3. Samples for electroplating deposition

кислотности – метромилливольтметр рН-121. Температура электролита поддерживалась и контролировалась термометрами «ТПП-11» (ГОСТ 13717-74) и «ТН-5» (ГОСТ 400-80)⁸ [21].

После этого на подготовленные образцы наносилось хромовое покрытие. Кинематика движения инструмента при нанесении покрытия на внутреннюю цилиндрическую поверхность представляет собой сочетание двух видов движения: ω – вращательное движение инструмента вокруг оси симметрии и v – возвратно-поступательное движение вдоль внешней стороны образующей цилиндрического тела (рис. 4).



Р и с. 4. Схема кинематики метода ГКО:
1 – деталь; 2 – инструмент

Fig. 4. Kinematics scheme of the electroplating deposition method: 1 – part; 2 – tool

Возвратно-поступательное движение обеспечивает кулисный механизм. Для положительного влияния на характеристики полученных композитных покрытий необходимо обеспечить равномерность получаемых осадков. Поэтому в процессе проектирования траектории движения инструмента учитывается различная скорость его перемещения вдоль детали в местах,

близкорасположенных к кромке. Развертка кинематики движения инструмента вверх и вниз при восстановлении внутренней цилиндрической поверхности представлена на рисунке 5 [19; 20].

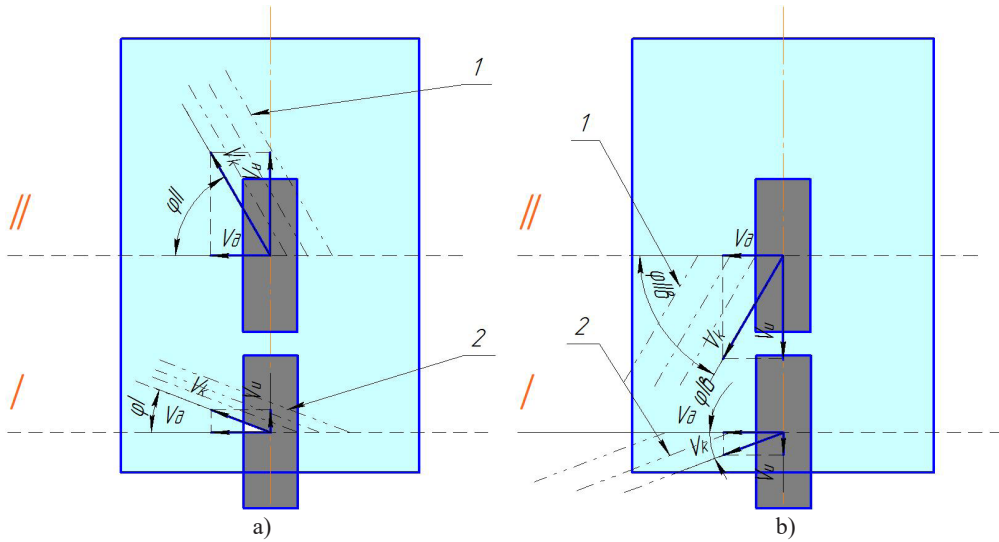
Таким образом, при нанесении композитного покрытия методом ГКО возможно два основных положения инструмента на поверхности детали: *I* – начало движения инструмента, *II* – проходные точки с максимальной линейной скоростью [9]. Положение результирующего вектора V_k определяет направление формирования наносимого композитного покрытия как при его перемещении вверх (рис. 5a), так и в противоположном направлении (рис. 5b) [19].

Структура многослойного композиционного покрытия определяется сочетанием векторов главного и вспомогательного движения, а также соотношением скоростей в различных зонах восстанавливаемой поверхности детали. Возможные варианты формирования структуры композитного покрытия, в зависимости от сочетания векторов движения и соотношения скоростей инструмента, представлены на рисунке 6 [19; 20].

Оценку модуля упругости композитного материала, нанесенного способом ГКО, рассмотрим на примере многослойного покрытия, состоящего из однонаправленных и не согласованных между собой по ориентации элементарных слоев. В ходе расчетов будем использовать общую, «глобальную», систему координат (x, y) и местные локальные однонаправленные слои в сопутствующей системе координат ($1^{(k)}, 2^{(k)}$) (рис. 7) [19].

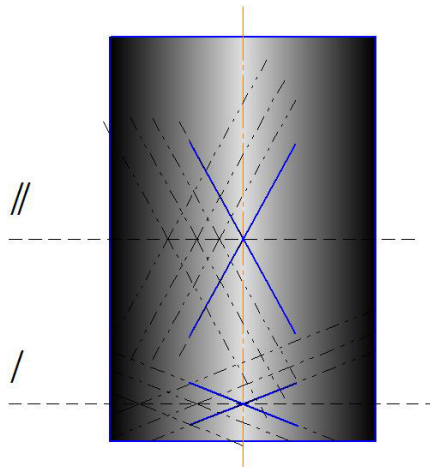
Для предложенной модели определить упругие постоянные многослойного композитного материала возможно, если будут известны характеристики жесткости (податливости) отдельных слоев.

⁸ ГОСТ 13717-74. Приборы манометрического принципа действия показывающие электроконтактные. Общие технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 1999; ГОСТ 400-80. Термометры стеклянные для испытаний нефтепродуктов. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2008.



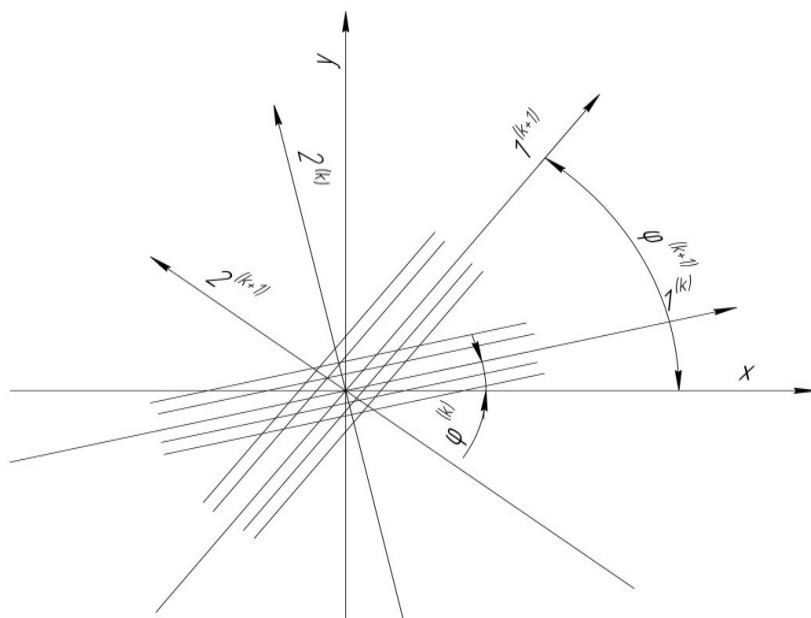
Р и с. 5. Развертка кинематики движения инструмента способом ГКО:
 а) движение вверх; б) движение вниз; *I, II* – варианты сечения с разными углами нанесения волокна композита; 1 – направление волокна композита в слое при положении инструмента в центральной точке контакта; 2 – направление волокна композита в слое при положении инструмента на периферии контакта

Fig. 5. Scan of the kinematics of the tool movement by the electroplating deposition method:
 a) upward movement; b) downward movement; *I, II* – cross-section options with different angles of application of the composite fiber; 1 – direction of the composite fiber in the layer when the tool is positioned at the central point of contact; 2 – direction of the composite fiber in the layer when the tool is positioned at the contact periphery



Р и с. 6. Кинематика движения инструмента при нанесении многослойного композитного покрытия способом ГКО: *I, II* – варианты сечения с разными углами нанесения волокна композита

Fig. 6. Kinematics of tool movement when applying a multi-layer composite coating by the electroplating deposition method: *I, II* – cross-section options with different angles of application of the composite fiber

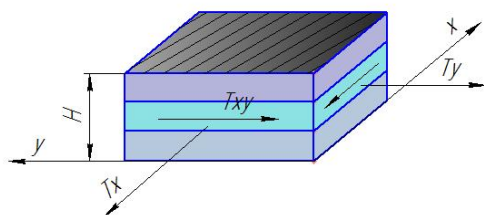


Р и с. 7. Схема структуры многослойного композитного покрытия:
 k – номер однонаправленного слоя [9]

F i g. 7. Structure diagram of a multilayer composite coating:
 k – number of the unidirectional layer

Результаты исследования

Для моделирования сил действия инструмента на обрабатываемую поверхность впишем элементарный слой получаемого покрытия в плоскую систему координат xOy (рис. 8) [21–23].



Р и с. 8. Единичный элемент многослойного покрытия

F i g. 8. Single element of a multi-layer coating

Силы прижатия инструмента к единичной площади сечения поверхно-

сти детали при нанесении композитного покрытия T_x, T_y, T_{xy} определяются по следующим уравнениям равновесия:

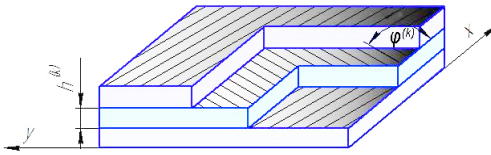
$$\begin{aligned}
 T_x &= \sum_{k=1}^n \sigma_x^k h^k, \\
 T_y &= \sum_{k=1}^n \sigma_y^k h^k, \\
 T_{xy} &= \sum_{k=1}^n \tau_{xy}^k h^k,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где σ, τ – напряжения в слоях, МПа; h – толщина единичного слоя, мм; n – число слоев в пакете, шт.

Определим средние напряжения многослойного покрытия, разделив уравнение равновесия (1) на суммарную толщину $H = \sum_{k=1}^n h^{(k)}$, и получим:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sum_{k=1}^n \sigma_x^k \bar{h}^k, \\ \sigma_y &= \sum_{k=1}^n \sigma_y^k \bar{h}^k, \\ \tau_{xy} &= \sum_{k=1}^n \tau_{xy}^k \bar{h}^k,\end{aligned}\quad (2)$$

где σ_x , σ_y , τ_{xy} – средние напряжения многослойного покрытия, $\sigma_x = T_x / H$, $\sigma_y = T_y / H$, $\tau_{xy} = T_{xy} / H$; $\bar{h}^k = h^{(k)} / H$ – толщина единичного k -го слоя (рис. 9).



Р и с. 9. Схема разреза многослойного покрытия

F i g. 9. Multi-layer coating section diagram

Тогда закон Гука для единичного слоя k многослойного покрытия будет иметь вид [24; 25]:

$$\{\sigma_{xy}\}^k = [\bar{G}^k] \{\varepsilon_{xy}\}^k, \quad (3)$$

где σ_{xy} – напряжения в единичных слоях, МПа; \bar{G} – коэффициент жесткости, Н/м; ε_{xy} – относительные деформации слоев.

Выражение (2), с учетом деформаций слоев, равных $\varepsilon_x = \varepsilon_x^{(k)}$, $\varepsilon_y = \varepsilon_y^{(k)}$, $\gamma_{xy} = \gamma_{xy}^{(k)}$, и закона Гука (3), будет иметь вид:

$$\{\sigma_{xy}\} = [G] \{\varepsilon_{xy}\}. \quad (4)$$

Из уравнения (4) видно, что средние напряжения в слоях многослойного композитного покрытия для плоского напряженного состояния пропорциональны деформациям в слоях и коэффициенту жесткости. Для оценки влияния коэффициента жесткости слоев выражение (2) разложим на составляющие по осям в виде:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{12} & g_{22} & g_{23} \\ g_{13} & g_{23} & g_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}, \quad (5)$$

где $g_{ij} = \sum_{k=1}^n g_{ij}^{(k)} h^{(k)}$ – коэффициент жесткости слоев; k – натуральное число.

Анализ выражения (5) показывает, что коэффициент жесткости в многослойном композитном покрытии не зависит от характера чередования единичных слоев. Это означает, что многослойные покрытия, у которых единичные слои будут иметь равный коэффициент жесткости, можно принимать за единый слой определенной толщины. К таким многослойным покрытиям относятся материалы с уложенными однонаправленными слоями под углом ϕ .

Нанесение многослойного покрытия способом ГКО происходит при поступательном и вращательном движениях инструмента. Рассмотрев поворот инструмента для однородного материала, например вокруг оси z на угол θ в уравнении (5), определим коэффициенты жесткости композита [26–28]:

$$\begin{aligned}\bar{g}_{11} &= V_1 + V_2 \cos 2\phi + V_3 \cos 4\phi, \\ \bar{g}_{12} &= V_1 - 2V_4 - V_3 \cos 4\phi, \\ \bar{g}_{13} &= \frac{1}{2} V_2 \sin 2\phi + V_3 \sin 4\phi, \\ \bar{g}_{22} &= V_1 + V_2 \cos 2\phi + V_3 \cos 4\phi, \\ \bar{g}_{23} &= \frac{1}{2} V_2 \sin 2\phi - V_3 \sin 4\phi, \\ \bar{g}_{33} &= V_4 - V_3 \cos 4\phi.\end{aligned}\quad (6)$$

Угол поворота системы координат θ вокруг оси z – постоянная величина для единичных слоев. Применяя к выражениям (6) формулу суммарного тригонометрического тождества, проведем расчет коэффициента жесткости на примере $g_{11}(\theta)$:

$$\begin{aligned}
 g_{11}(\theta) = & \sum_{k=1}^n (V_1 + V_2 \cos 2\phi^{(k)} \cos 2\theta + \\
 & + V_2 \sin 2\phi^{(k)} \sin 2\theta + V_3 \cos 4\phi^{(k)} \cos 4\theta + \\
 & + V_3 \sin 4\phi^{(k)} \sin 4\theta) \bar{h}^{(k)} = V_1 + \\
 & + V_2 \cos 2\theta \sum_{k=1}^n \bar{h}^{(k)} \cos 2\phi^{(k)} + \\
 & + V_2 \sin 2\theta \sum_{k=1}^n \bar{h}^{(k)} \sin 2\phi^{(k)} + \\
 & + V_3 \cos 4\theta \sum_{k=1}^n \bar{h}^{(k)} \cos 4\phi^{(k)} + \\
 & + V_3 \sin 4\theta \sum_{k=1}^n \bar{h}^{(k)} \sin 4\phi^{(k)}. \quad (7)
 \end{aligned}$$

Аналогичные расчетные выражения получаются для коэффициентов жесткости $g_{ij}(\theta)$.

Таким образом, в системе координат xOy средние значения коэффициентов жесткости запишутся в виде:

$$\langle g_{ij} \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} g_{ij}(\theta) d\theta. \quad (8)$$

Тогда интегральная (суммарная) запись коэффициентов жесткости, например для $k \langle g_{11} \rangle$, будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 \langle g_{11} \rangle = & \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} g_{11}(\theta) d\theta = V_1 + \\
 & + \frac{V_2}{2\pi} \left(\int_0^{2\pi} \cos 2\theta d\theta \sum_{k=1}^n \bar{h}^{(k)} \cos 2\phi^{(k)} + \right. \\
 & \left. + \int_0^{2\pi} \sin 2\theta d\theta \sum_{k=1}^n \bar{h}^{(k)} \sin 2\phi^{(k)} \right) + \\
 & + \frac{V_3}{2\pi} \left(\int_0^{2\pi} \cos 4\theta d\theta \sum_{k=1}^n \bar{h}^{(k)} \cos 4\phi^{(k)} + \right. \\
 & \left. + \int_0^{2\pi} \sin 4\theta d\theta \sum_{k=1}^n \bar{h}^{(k)} \sin 4\phi^{(k)} \right).
 \end{aligned}$$

В данном выражении коэффициент жесткости $\langle g_{11} \rangle$ интегралы

тригонометрических значений угла θ поворота системы координат $\int_0^{2\pi} \cos k\theta d\theta$, $\int_0^{2\pi} \sin k\theta d\theta$ равны нулю.

С учетом выражения (6) средние значения коэффициентов жесткости многослойных материалов, состоящих из единичных слоев однонаправленной укладки инструментом, будут равны:

$$\begin{aligned}
 \langle g_{11} \rangle = V_1; \langle g_{12} \rangle = V_2 - 2V_4; \langle g_{22} \rangle = V_1; \\
 \langle g_{13} \rangle = 0; \langle g_{23} \rangle = 0; \langle g_{33} \rangle = V_4. \quad (9)
 \end{aligned}$$

Из полученного выражения (9) следует, что для многослойных покрытий средние значения коэффициентов жесткости не зависят от углов укладки инструментом сетки армирования слоев и их толщины, а определяются только физико-механическими свойствами материала.

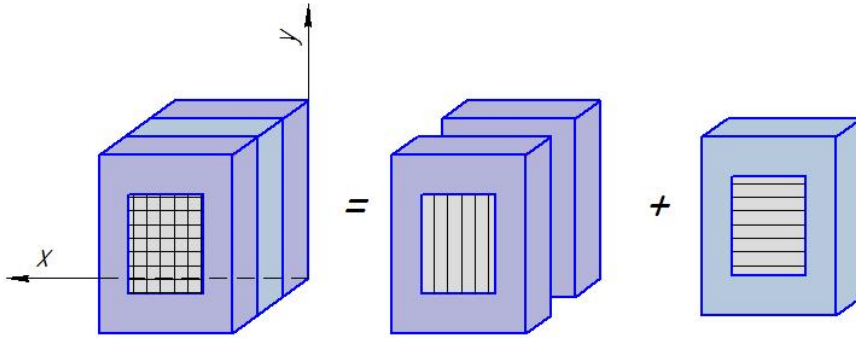
Полученные свойства многослойных композитных покрытий, полученных способом ГКО, имеют три основных вида структуры в зависимости от кинематики движения инструмента. Рассмотрим каждый вид структуры многослойного покрытия по отдельности.

Ортогонально-армированная структура покрытия

Структура таких покрытий состоит из слоев n , нанесенных под углом $\varphi^{(1)} = 0^\circ$ и $\varphi^{(2)} = 90^\circ$ (рис. 10).

Тогда общая толщина слоев состоит из слоев первого типа $\bar{h}^{(1)}$ и слоев второго типа $\bar{h}^{(2)}$. При этом эти слои имеют равные коэффициенты жесткости, так как выполнены из однонаправленного материала.

Тогда формула (5) для расчета коэффициентов жесткости однонаправленных слоев ортогонально-армированной структуры покрытия будет иметь вид:



Р и с. 10. Схема ортогонально-армированной структуры покрытия

F i g. 10. Diagram of the orthogonally reinforced coating structure

$$\begin{aligned}
 g_{11} &= g_{11}^0 \bar{h}^{(1)} + g_{22}^0 \bar{h}^{(2)}, \\
 g_{22} &= g_{22}^0 \bar{h}^{(1)} + g_{11}^0 \bar{h}^{(2)}, \\
 g_{12} = g_{12}^0, g_{33} = g_{33}^0, g_{13} = g_{23} &= 0. \quad (10)
 \end{aligned}$$

Структура матрицы коэффициентов жесткости такого покрытия ($g_{13} = g_{23} = 0$) позволяет считать разными свойства по направлениям взаимно перпендикулярных осей, которые совпадают с осями x и y .

Перекрестно-армированная структура покрытия

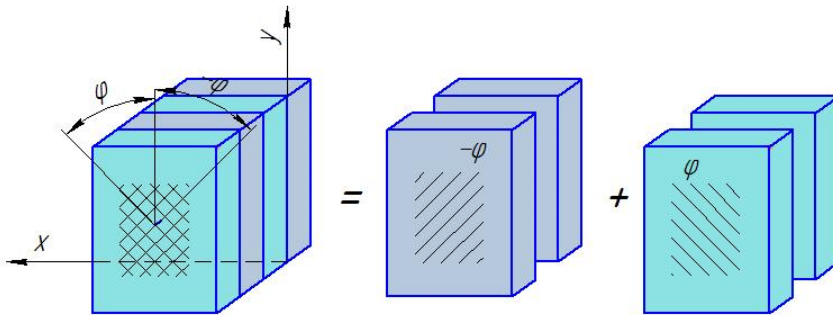
Структура таких покрытий состоит из $2n$ слоев, которые уложены к оси x под углами $\pm\varphi$ (рис. 11).

Тогда формула (5) для расчета коэффициентов жесткости однонаправленных слоев перекрестно-арми-

рованной структуры покрытия будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 g_{11} &= \frac{1}{2} (\bar{g}_{11}^1 + \bar{g}_{11}^2) = \bar{g}_{11}, \\
 g_{22} &= \frac{1}{2} (\bar{g}_{22}^1 + \bar{g}_{22}^2) = \bar{g}_{22}, \\
 g_{12} &= \frac{1}{2} (\bar{g}_{12}^1 + \bar{g}_{12}^2) = \bar{g}_{12}, \\
 g_{66} &= \frac{1}{2} (\bar{g}_{33}^1 + \bar{g}_{33}^2) = \bar{g}_{33}, \\
 g_{13} = g_{23} &= 0. \quad (11)
 \end{aligned}$$

Инструменты движутся во время укладки слоев покрытия с углами, равными $\varphi = \pm 45^\circ$. В связи с этим получаем следующие коэффициенты жесткости, учитывая выражения (6) и (10):



Р и с. 11. Схема перекрестно-армированной структуры покрытия

F i g. 11. Diagram of the cross-reinforced coating structure

$$\begin{aligned}
 g_{11} = g_{22} &= \frac{(g_{11}^0 + 2g_{12}^0 + g_{22}^0 + 4g_{33}^0)}{4}, \\
 g_{12} &= \frac{(g_{11}^0 + 2g_{12}^0 + g_{22}^0 - 4g_{33}^0)}{4}, \\
 g_{33} &= \frac{(g_{11}^0 - 2g_{12}^0 + g_{22}^0)}{4}, \\
 g_{13} = g_{23} &= 0.
 \end{aligned} \quad (12)$$

Представленные ниже данные коррелируют с ранее опубликованными результатами аналитической оценки свойств дисперсно-упрочненных гальванических композитных многослойных покрытий [19]. Полученные результаты расчета коэффициентов жесткости показывают, что перекрестно-армированная структура при средней толщине покрытия первого и второго типа, равной $\bar{h}^{(1)} = \bar{h}^{(2)} = 0,5$, является ортогональной.

Однако равные коэффициенты жесткости материала в двух ортогональных направлениях ($g_{11} = g_{22}$) не являются доказательством одинаковых свойств в плоской системе координат xOy .

Квазиизотропная структура покрытия

Такая структура многослойного композитного покрытия включает слои одинаковой толщины с углом укладки $\varphi^{(k)} = k\pi/n$, $k \in \mathbb{N}$, $n \geq 3$. Примеры таких материалов – композиты со схемой укладки слоев с углами $\varphi = \pm 30^\circ$ и $\varphi = 90^\circ$ или $\varphi = 0^\circ$, $\varphi = \pm 45^\circ$ и $\varphi = 90^\circ$ [19].

Тогда для квазиизотропной структуры покрытия значение коэффициента жесткости, например g_{11} , будет равно:

$$g_{11} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(V_1 + V_2 \cos \frac{2\pi k}{n} + V_3 \cos \frac{4\pi k}{n} \right) \quad (13)$$

при условии, что среднее значение толщины слоев равно $\bar{h}^{(k)} = \frac{1}{n}$.

В данном выражении коэффициента жесткости g_{11} суммарные

тригонометрические выражения $\sum_{k=1}^n \cos\left(\frac{2\pi k}{n}\right)$, $\sum_{k=1}^n \cos\left(\frac{4\pi k}{n}\right)$ равны нулю при заданных углах. Так как эти суммарные тригонометрические выражения входят в выражения для остальных коэффициентов жесткости g_{12} , g_{22} , g_{32} , то $g_{11} = g_{22} = V_1$, $g_{12} = V_1 - 2V_4$, $g_{66} = V_4$ [19].

По аналогии с выражением (13) для коэффициентов жесткости g_{13} , g_{23} суммарные тригонометрические выражения $\sum_{k=1}^n \sin\left(\frac{2\pi k}{n}\right)$, $\sum_{k=1}^n \sin\left(\frac{4\pi k}{n}\right)$ также равны нулю. Поэтому $g_{16} = g_{26} = 0$, а материал имеет разные физико-механические свойства по разным направлениям.

Для определения модуля упругости многослойного композитного покрытия, используемого в технических расчетах для выбора наносимого материала, рассмотрим деформации многослойного композита, например, в направлении оси x . Тогда уравнения (5) примут вид:

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= g_{11}\varepsilon_x + g_{12}\varepsilon_y + g_{13}\gamma_{xy}, \\
 0 &= g_{12}\varepsilon_x + g_{22}\varepsilon_y + g_{23}\gamma_{xy}, \\
 0 &= g_{13}\varepsilon_x + g_{23}\varepsilon_y + g_{33}\gamma_{xy}.
 \end{aligned} \quad (14)$$

Выводя ε_y и γ_{xy} из 2-го и 3-го уравнений (14), подставляем их в первое уравнение. В этом случае для определения модуля упругости можно записать выражение:

$$E_x = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x} = \frac{g_{11}g_{22}g_{33} + 2g_{12}g_{23}g_{13} - g_{11}g_{23}^2 - g_{22}g_{13}^2 - g_{33}g_{12}^2}{g_{22}g_{33} - g_{23}^2}. \quad (15)$$

Обозначим $\Delta_g = \det \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{12} & g_{22} & g_{23} \\ g_{13} & g_{23} & g_{33} \end{bmatrix}$.

Тогда выражение (15) примет вид:

$$E_x = \frac{\Delta_g}{g_{22}g_{33} - g_{23}^2}. \quad (16)$$

Аналогично для остальных констант Ламе:

$$E_y = \frac{\Delta_g}{g_{11}g_{33} - g_{13}^2}, G_{xy} = \frac{\Delta_g}{g_{11}g_{22} - g_{12}^2},$$

$$v_{xy} = \frac{g_{12}g_{33} - g_{13}g_{23}}{g_{22}g_{33} - g_{23}^2}. \quad (17)$$

В случае ортотропного композита ($g_{16} = g_{26} = 0$) формулы констант Ламе примут вид:

$$E_x = g_{11} - \frac{g_{12}^2}{g_{22}}, E_y = g_{22} - \frac{g_{12}^2}{g_{11}},$$

$$G_{xy} = g_{33}, v_{xy} = \frac{g_{12}}{g_{22}}. \quad (18)$$

Таким образом, при повороте системы координат x, y, z вокруг оси z на заданный угол θ коэффициенты жесткости $g_{ij}(\theta)$ будут определены по типовым формулам (8). По полученным значениям коэффициентов жесткости,

с учетом выражений (17) и (18), определяются постоянные модуля упругости при технических расчетах.

Обсуждение и заключение

Согласно моделированию деформаций композитных слоев, нанесенных способом ГКО, доказано, что при определении модуля упругости их можно рассматривать не по отдельности, а как один слой заданной толщины. При нанесении многослойного покрытия его структура не зависит от углов кинематического движения инструмента по внутренней поверхности цилиндрической детали и может быть трех видов: ортогонально-армированная, перекрестно-армированная и квазиизотропная.

При обработке поверхности инструментом получены зависимости для определения коэффициентов жесткости многослойного покрытия. По значениям коэффициентов жесткости выведены зависимости для расчета модуля упругости наносимого материала.

Полученные результаты имеют практическую значимость при выборе материала наносимого покрытия для восстановления внутренних цилиндрических поверхностей деталей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Бураев, М. К.** Обеспечение работоспособности автотракторной техники корректированием расхода запасных частей при техническом сервисе / М. К. Бураев, А. В. Шистеев // Вестник ВСГУТУ. – 2019. – № 3 (74). – С. 69–76. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40539855> (дата обращения: 01.05.2021). – Рез. англ.
2. Способ и устройство для восстановления плунжерной пары топливного насоса высокого давления / А. С. Канищев, А. Е. Ломовских, А. К. Агафонов [и др.]. – DOI 10.35887/2305-2538-2020-6-51-59 // Наука в центральной России. – 2020. – № 6 (48). – С. 51–59. – Рез. англ.
3. **Величко, С. А.** Оценка предельного состояния тестоделительных машин вакуумно-поршневого типа по критерию расхода масла / С. А. Величко, Е. Г. Мартынова, В. И. Иванов. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202003.448-463 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 3. – С. 448–463. – Рез. англ.
4. **Дорогой, В. Н.** Использование нового ресурсосберегающего метода для обслуживания деталей машин / В. Н. Дорогой, В. М. Михлин // Грузовое и пассажирское автохозяйство. – 2014. – № 1. – С. 69–72. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21289248> (дата обращения: 01.05.2021). – Рез. англ.

5. **Ли, Р. Н.** Эластомерный наноккомпозит для восстановления изношенных корпусных деталей автотракторной техники / Р. Н. Ли, Д. Н. Псарев, М. Р. Киба. – DOI 10.35887/2305-2538-2021-1-69-79 // Наука в центральной России. – 2021. – № 1 (49). – С. 69–79. – Рез. англ.

6. **Семенihin, Б. А.** Восстановление и упрочнение деталей автотракторной техники композиционными гальваническими покрытиями с использованием порошков твердых сплавов / Б. А. Семенihin, Л. П. Кузнецова, Р. А. Латыпов // Труды ГОСНИТИ. – 2012. – Т. 109, № 2. – С. 57–60. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18190495> (дата обращения: 01.05.2021). – Рез. англ.

7. Композиционные СВС-материалы на основе карбида и никелида титана, легированные тугоплавким наноккомпонентом / Ю. С. Погожев, Е. А. Левашов, А. Е. Кудряшов [и др.] // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2012. – № 2. – С. 24–32. – URL: <https://powder.misis.ru/jour/issue/view/19> (дата обращения: 01.05.2021).

8. Влияние природы электродных материалов на эрозию и свойства легированного слоя. Критерии оценки эффективности электроискрового легирования / А. Д. Верхотуров, В. И. Иванов, А. С. Дорохов [и др.]. – DOI 10.15507/0236-2910.028.201803.302-320 // Вестник Мордовского университета. – 2018. – Т. 28, № 3. – С. 302–320. – Рез. англ.

9. Моделирование процесса нанесения на металлическую поверхность многослойных композитов на основе механики сплошных сред / С. Ю. Жачкин, М. В. Астахов, Г. В. Зибров [и др.] // Труды ГОСНИТИ. – 2014. – Т. 114, № 1. – С. 122–127. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21308815> (дата обращения: 01.05.2021). – Рез. англ.

10. Применение наноккарбонитрида хрома в композиционных гальванических покрытиях на основе никеля / Л. С. Ширияева, И. В. Ноздрин, Г. В. Галевский, В. В. Руднева // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2014. – № 3 (9). – С. 48–52. – URL: <https://clck.ru/WkSFX> (дата обращения: 01.05.2021). – Рез. англ.

11. **Ноздрин, И. В.** Гальванические композиционные покрытия цинк – диборид хрома: электроосаждение и свойства / И. В. Ноздрин, В. В. Руднева, Г. В. Галевский // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. – 2014. – № 32. – С. 107–112. – URL: <https://www.sibsiu.ru/downloads/public/vestnikgmsraen/32.pdf> (дата обращения: 01.05.2021).

12. **Жачкин, С. Ю.** Моделирование напряженнодеформированного состояния поверхностного слоя при нанесении композитных покрытий методом ГКО / С. Ю. Жачкин, Н. А. Пеньков, А. А. Живогин // Машинно-технологическая станция. – 2013. – № 2. – С. 29–34. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19129477> (дата обращения: 01.05.2021). – Рез. англ.

13. Determination of the Heat Resistance of Polymer Construction Materials by the Dynamic Mechanical Method / V. O. Startsev, M. V. Molokov, A. N. Blaznov [et al.]. – DOI 10.1134/s1995421217040141 // Polymer Science, Series D. – 2017. – Vol. 10, Issue 4. – Pp. 313–317.

14. Исследование физико-механических свойств электроосаждаемого композиционного материала никель-наноккарбонитрид хрома / Л. С. Ширияева, И. В. Ноздрин, Г. В. Галевский, В. В. Руднева // Перспективные материалы. – 2014. – № 7. – С. 62–67. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21801155> (дата обращения: 01.05.2021). – Рез. англ.

15. **Кукса, Л. В.** Метод определения упругих свойств однофазных металлов / Л. В. Кукса, Л. М. Арзамаскова // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т. 79, № 3. – С. 60–62. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18888962> (дата обращения: 01.05.2021). – Рез. англ.

16. **Бульчев, С. И.** Определение модуля Юнга по твердости / С. И. Бульчев, А. В. Калмакова, А. Н. Кравченко // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2009. – Т. 75, № 9. – С. 63–66. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12890609> (дата обращения: 01.05.2021). – Рез. англ.

17. **Бульчев, С. И.** Кинетическое индентирование и гистерезис в отпечатке / С. И. Бульчев, В. В. Порошин, В. П. Алехин // Деформация и разрушение. – 2006. – № 8. – С. 39–46. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11969161> (дата обращения: 01.05.2021).

18. **Богодухов, С. И.** Определение модуля упругости различных материалов с применением средств тензометрии / С. И. Богодухов, В. С. Гарипов, Е. В. Солосина // Вестник Оренбургского

государственного университета. – 2014. – № 4 (165). – С. 289–294. – URL: <https://elck.ru/WkVykh> (дата обращения: 01.05.2021). – Рез. англ.

19. Аналитическая оценка свойств дисперсно-упрочненных гальванических композитных многослойных покрытий / С. Ю. Жачкин, Н. А. Пеньков, А. И. Краснов, К. А. Манаенков // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2015. – № 1. – С. 142–149. – URL: http://www.mgau.ru/science/journal/PDF_files/1-2015.pdf (дата обращения: 01.05.2021). – Рез. англ.

20. **Zhachkin, S. Yu.** Dispersion-Hardened Composite Coatings with Desired Physical and Mechanical Properties / S. Yu. Zhachkin, N. A. Penkov, M. N. Krasnova // Engineering Computations. – 2017. – Vol. 34, Issue 8. – Pp. 2577–2585. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43036928> (дата обращения: 01.05.2021).

21. Управление внутренними напряжениями в гальванических композитных покрытиях на основе железа / С. Ю. Жачкин, Н. А. Пеньков, О. А. Сидоркин, С. В. Нельсов // Труды ГОСНИТИ. – 2017. – Т. 129. – С. 183–187. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30593131> (дата обращения: 01.05.2021). – Рез. англ.

22. **Chen, Q.** Computer Simulation of Solid-Particle Erosion of Composite Materials / Q. Chen, D. Y. Li. – DOI 10.1016/S0043-1648(03)00065-6 // Wear. – 2003. – Vol. 255, Issue 1–6. – Pp. 78–84.

23. Компьютерное моделирование свойств плеча балластной призмы железнодорожного пути, омоноличенной полимерными связующими на основе полиуретана / З. Б. Хакиев, А. А. Кругликов, Я. М. Ермолов, В. А. Явна // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 3 (71). – С. 142–152. – URL: http://vestnik.rgups.ru/wp-content/uploads/2018/10/2018_3_vestnik_rgups_a.pdf (дата обращения: 01.05.2021). – Рез. англ.

24. **Voronin, N. A.** Analysis of the Mechanisms of Deformation of Topocomposites by Modeling of the Indentation Load-Displacement Curves / N. A. Voronin. – DOI 10.3934/matersci.2019.3.397 // AIMS Materials Science. – 2019. – Vol. 6, Issue 3. – Pp. 397–405.

25. **Васильев, В. И.** Решение задач однофазной фильтрации методом конечных элементов на вычислительном кластере / В. И. Васильев, М. В. Васильева, Д. Я. Никифоров // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. – 2016. – № 6. – С. 8–17. – URL: <https://elck.ru/TFXvww> (дата обращения: 01.04.2021). – Рез. англ.

26. Моделирование температурного поля поверхности при электронном легировании металлов / В. Д. Власенко, В. И. Иванов, В. Ф. Аулов [и др.]. – DOI 10.15507/2658-4123.029.201902.218-233 // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 2. – С. 218–233.

27. **Ivanov, V. I.** Hardening of Objects and the Increase of Their Lifetime by the Electrospark Method: The Object Classification and the Specific Features of the Technology / V. I. Ivanov, F. K. Burumkulov. – DOI 10.3103/s1068375510050042 // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2010. – Vol. 46, Issue 5. – Pp. 416–423.

28. New Possibilities of Plasma Spraying of Wear-Resistant Coatings / S. N. Grigorev, O. B. Kovaliev, V. I. Kuzmin [et al.]. – DOI 10.3103/S1068366613030070 // Journal of Friction and Wear. – 2013. – Vol. 34, Issue 3. – Pp. 161–165.

Поступила 26.04.2021; одобрена после рецензирования 20.05.2021; принята к публикации 01.06.2021

Об авторах:

Жачкин Сергей Юрьевич, профессор кафедры автоматизированного оборудования машиностроительного производства ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (394026, Российская Федерация, г. Воронеж, пр-т Московский, д. 14), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1844-5011>, zhach@list.ru

Завражнов Анатолий Иванович, профессор кафедры технологических процессов и технической безопасности ФГБОУ ВО «Мичуринский ГАУ» (393760, Российская Федерация, г. Мичуринск, ул. Интернациональная, д. 101), академик РАН, доктор технических наук, aiz@mgau.ru

Пеньков Никита Алексеевич, начальник лаборатории методического обеспечения образовательной деятельности ФГКВУ ВО «ВУНЦ ВВС «ВВА»» (394064, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54А), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4644-3814>, myth_np_nikit@mail.ru

Electrotechnologies and electrical equipment in agriculture

Мартынов Алексей Владимирович, доцент кафедры технического сервиса машин Института механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, Researcher ID: [AAR-8786-2020](https://orcid.org/0000-0003-4744-4373), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4744-4373>, martynov-230685@yandex.ru

Задорожний Роман Николаевич, ведущий научный сотрудник ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8007-0732>, Scopus ID: [57215670358](https://orcid.org/0000-0002-8007-0732), busun_007@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

С. Ю. Жачкин – формулирование основной концепции исследования и анализ результатов.

А. И. Завражнов – методическое руководство.

Н. А. Пеньков – экспериментальные исследования.

А. В. Мартынов – план статьи и ее написание.

Р. Н. Задорожний – формирование выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Buraev M.K., Shisteev A.V. Ensuring the Efficiency of Motor-and-Tractor Equipment by Adjusting the Consumption of Spare Parts for Technical Service. *Vestnik VSGUTU = ESSUTM Bulletin*. 2019; (3):69-76. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40539855> (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

2. Kanishchev A.S., Lomovskikh A.Ye., Agafonov A.K., et al. Method and Device for Restoring the Plunger Pair of a High-Pressure Fuel Pump. *Nauka v tsentralnoy Rossii = Science in the Central Russia*. 2020; (6):51-59. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2020-6-51-59>

3. Velichko S.A., Martynova E.G., Ivanov V.I. The Assessment of the Limit State of the Vacuum Piston Type Dough Divider by Oil Consumption. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy = Engineering Technologies and Systems*. 2020; 30(3):448-463. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.448-463>

4. Dorogoy V.N., Mikhlin V.M. Use of a New Resource-Saving Method for Service of Details of Machines. *Gruzovoe i passazhirskoe avtokhozyaystvo = Cargo and Passenger Vehicles*. 2014; (1):69-72. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21289248> (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

5. Li R.N., Psarev D.N., Kiba M.R. Elastomeric Nanocomposite for Restoration Worn-Out Body Parts Vehicles and Tractors. *Nauka v tsentralnoy Rossii = Science in the Central Russia*. 2021; (1):69-79. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2021-1-69-79>

6. Semenikhin B.A., Kuznetsova L.P., Latypov R.A. Recovery and Hardening of Details of Auto-tractor Technics by Composite Galvanic Coverings with Use of Powders of the Scraps of Rigid Alloys Received Electroerosive Dispersion. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2012; 109(2):57-60. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18190495> (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

7. Pogozhev Yu.S., Levashov Ye.A., Kudryashov A.Ye., et al. [Self-Propagating High-Temperature Synthesis Composites Based on Titanium Carbide and Nickelide, Alloyed with Refractory Nanocomponents]. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnye pokrytiya = Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2012; (2):24-32. Available at: <https://powder.misis.ru/jour/issue/view/19> (accessed 01.05.2021). (In Russ.)

8. Verkhotur A.D., Ivanov V.I., Dorokhov A.S., et al. Effect of the Nature of Electrode Materials on Erosion and Properties of Doped Layers. The Criteria for Evaluating the Effectiveness of Electrospray Alloying. *Vestnik Mordovskogo universiteta = Mordovia University Bulletin*. 2018; 28(3):302-320. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.302-320>

9. Zhachkin S.Yu., Astakhov M.V., Zibrov G.V., et al. Modeling of the Deposition Process on the Metal Surface of Multilayer Composites Based on Continuum Mechanics. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2014; 114(1):122-127. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21308815> (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
10. Shiryayeva L.S., Nozdrin I.V., Galevskiy G.V., Rudneva V.V. Application of Chromium Nanocarbonitride in Galvanic Composition Coatings on the Basis of Nickel. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrialnogo universiteta = Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2014; (3):48-52. Available at: <https://clck.ru/WkSFX> (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
11. Nozdrin I.V., Rudneva V.V., Galevskiy G.V. [Galvanic Zinc-Chromium Diboride Composite Coatings: Electrodeposition and Properties]. *Vestnik gorno-metallurgicheskoy sektsii Rossiyskoy akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii = Bulletin of the Mining and Metallurgical Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Department of Metallurgy*. 2014; (32):107-112. Available at: <https://www.sibsiu.ru/downloads/public/vestnikgmsraen/32.pdf> (accessed 01.05.2021). (In Russ.)
12. Zhachkin S.Yu., Penkov N.A., Zhivogin A.A. Design of the Tensely-Deformed State of Superficial Layer at Causing of Composite Coverages by GCP Method. *Mashinno-tekhnologicheskaya stantsiya = Machine and Technology Station*. 2013; (2):29-34. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19129477> (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
13. Startsev V.O., Molokov M.V., Blaznov A.N., et al. Determination of the Heat Resistance of Polymer Construction Materials by the Dynamic Mechanical Method. *Polymer Science, Series D*. 2017; 10(4):313-317. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/s1995421217040141>
14. Shiryayeva L.S., Nozdrin I.V., Galevskii G.V., Rudneva V.V. Study of Physical and Mechanical Properties of Electrodeposited Nickel-Nanokarbonitrid Chromium Composite. *Perspektivnye materialy = Inorganic Materials: Applied Research*. 2014; (7):62-67. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21801155> (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
15. Kuksa L.V., Arzamaskova L.M. Method for Determining the Elastic Properties of Single-Phase Metals. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2013; 79(3):60-62. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18888962> (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
16. Bulychev S.I., Kalmakova A.V., Kravchenkov A.N. Determination of Young's Modulus from Hardness. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2009; 75(9):63-66. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12890609> (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
17. Bulychev S.I., Poroshin V.V., Alekhin V.P. [Kinetic Indentation and Hysteresis in the Print]. *Deformatsiya i razrusheniye = Deformation and Fracture of Materials*. 2006; (8):39-46. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11969161> (accessed 01.05.2021). (In Russ.)
18. Bogodukhov S.I., Garipov V.S., Solosina Ye.V. The Elasticity Modulus of Various Materials by Means of Strain Gauges. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of the Orenburg State University*. 2014; (4):289-294. Available at: <https://clck.ru/WkVyk> (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
19. Zhachkin S.Yu., Penkov N.A., Krasnov A.I., Manayenkov K.A. Analytical Evaluation of the Properties of Dispersion-Strengthened Galvanic Composite Multilayer Coatings. *Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Michurin State Agrarian University Bulletin*. 2015; (1):142-149. Available at: http://www.mgau.ru/sciense/journal/PDF_files/1-2015.pdf (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
20. Zhachkin S.Yu., Penkov N.A., Krasnova M.N. Dispersion-Hardened Composite Coatings with Desired Physical and Mechanical Properties. *Engineering Computations*. 2017; 34(8):2577-2585. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43036928> (accessed 01.05.2021). (In Eng.)
21. Zhachkin S.Yu., Penkov N.A., Sidorkin O.A., Nelysov S.V. Manage Internal Stresses in the Plating of Composite Coatings Based on Iron. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2017; 129:183-187. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30593131> (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
22. Chen Q., Li D.Y. Computer Simulation of Solid-Particle Erosion of Composite Materials. *Wear*. 2003; 255(1-6):78-84. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00065-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00065-6)

23. Khakiev Z.B., Kruglikov A.A., Yermolov Ya.M., Yavna V.A. Computer Model Operation of the Foundation Properties of the Railway Track's Ballast Prism with Joint Grouting Polymeric Binding on the Basis of Polyurethane. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya*. 2018; (3):142-152. Available at: http://vestnik.rgups.ru/wp-content/uploads/2018/10/2018_3_vestnik_rgups_a.pdf (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
24. Voronin N.A. Analysis of the Mechanisms of Deformation of Topocomposites by Modeling of the Indentation Load-Displacement Curves. *AIMS Materials Science*. 2019; 6(3):397-405. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3934/matricsci.2019.3.397>
25. Vasilev V.I., Vasileva M.V., Nikiforov D.Ia. Solving One Phase Filtration Problems Using Finite Element Method on Computing Cluster. *Vestnik Severo-Vostochnogo federalnogo universiteta im. M.K. Ammosova* = Vestnik of North-Eastern Federal University. 2016; (6):8-17. Available at: <https://clck.ru/TFXvw> (accessed 01.05.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
26. Vlasenko V.D., Ivanov V.I., Aulov V.F., et al. Modelling the Temperature Field of a Surface in Using Electrospark Alloying of Metals. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(2):218-233. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.218-233>
27. Ivanov V.I., Burumkulov F.K. Hardening of Objects and the Increase of Their Lifetime by the Electrospark Method: The Object Classification and the Specific Features of the Technology. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2010; 46(5):416-423. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/s1068375510050042>
28. Grigorev S.N., Kovalev O.B., Kuzmin V.I., et al. New Possibilities of Plasma Spraying of Wear-Resistant Coatings. *Journal of Friction and Wear*. 2013; 34(3):161-165. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068366613030070>

Received 26.04.2021; approved after reviewing 20.05.2021; accepted for publication 01.06.2021

About the authors:

Sergey Yu. Zhachkin, Professor of the Chair of Automated Equipment for Machine Building Production, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy Prospekt, Voronezh 394026, Russian Federation), D.Sc. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1844-5011>, zhach@list.ru

Anatoliy I. Zavrazhnov, Professor of the Chair of Technological Processes and Technosphere Safety, Michurinsk State Agrarian University (101 Internatsionalnaya St., Michurinsk 393760, Russian Federation), Academician of RAS, D.Sc. (Engr.), aiz@mgau.ru

Nikita A. Penkov, Head of the Laboratory for Methodological Support of Educational Activities, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy (54A Starykh Bolshevikov St., Voronezh 394064, Russian Federation), Cand.Sc. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4644-3814>, myth_np_nikit@mail.ru

Alexei V. Martynov, Associate Professor of the Technical Service Machines Chair of Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), Cand.Sc. (Engr.), Researcher ID: AAR-8786-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4744-4373>, martynov-230685@yandex.ru

Roman N. Zadorozhny, Leading Researcher of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5, 1st Institutskiy Proyezd, Moscow 109428, Russian Federation), Cand.Sc. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8007-0732>, Scopus ID: 57215670358, bosun_007@mail.ru

Contribution of the authors:

S. Yu. Zhachkin – formulation of the basic research concept and analysis of the results.

A. I. Zavrazhnov – methodological guidance.

N. A. Penkov – experimental studies.

A. V. Martynov – writing the draft.

R. N. Zadorozhny – drawing the conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.