



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 620.186
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-2-107-119

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОСЛОЙНОГО ФОРМИРОВАНИЯ НАНОСТРУКТУРНЫХ ТОПОКОМПОЗИТОВ МЕТОДАМИ ИОННО-ВАКУУМНОЙ ОБРАБОТКИ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНО-ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Коротаев Д.Н.¹, Тарасов Е.Е.², Полещенко К.Н.³, Теплоухов А.А.⁴, Семенюк Н.А.⁴, Орлов П.В.³, Чуранкин В.Г.⁴, Ласица А.М.⁴

¹Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Россия

²Федеральный научно-производственный центр «Прогресс», Омск, Россия

³Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Омск, Россия

⁴Омский государственный технический университет, Омск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Актуальность работы обусловлена необходимостью управления процессами структурной модификации поверхностных и приповерхностных слоёв при формировании наноструктурных топокомпозиатов на основе термодинамического подхода. Основная проблема заключается в необходимости разработки теории, позволяющей целенаправленно влиять на процессы послойной ионно-вакуумной модифицирующей обработки при создании наноструктурных топокомпозиатов. **Используемые методы.** Теоретическую основу исследования составили положения развиваемого авторами структурно-термодинамического подхода к анализу плазменных процессов. Экспериментальные результаты получены методами как ионно-плазменной, ионно-лучевой обработки, так и при ионном ассистировании в условиях каскадного перекрёстного эффекта. Для нанесения промежуточного оксидированного слоя применялись методики химического модифицирования поверхности: оксидирования и пассивации. Для исследования морфологии и адгезионных свойств систем «покрытие-интерфейс-основа» применялись методы электронной, зондовой микроскопии, а также скретч-тестирования образцов. **Новизна.** Разработана структурно-термодинамическая модель, раскрывающая природу эффектов модификации в системе «покрытие-интерфейс-основа» на микро-, субмикронном и наноструктурном уровнях под воздействием ионно-плазменных потоков. Установлена связь между термодинамическими параметрами и технологическими режимами ионно-вакуумной обработки, раскрывающая возможности управления процессами структурной модификации поверхностных и приповерхностных слоёв. Обнаружено формирование квазиволновых мультимодальных наноразмерных структур. **Результат.** На основе термодинамического анализа структурной модификации установлено, что формирование градиентного строения топокомпозиатов определяется активационными структурными процессами и управляется плотностью энергетического потока и реакцией материала на него, а диссипативных – интенсивностью энергомассопереноса в модифицируемой поверхности материала. Определяющей характеристикой формирования типа структурно-фазовых состояний и их протяжённостью (глубиной) в системе «покрытие-интерфейс-основа» является энергетический дисбаланс между активационными процессами, определяемыми интенсивностью ионно-вакуумного воздействия и диссипативными явлениями структурной релаксации материала основы. **Практическая значимость.** Результаты структурно-термодинамического анализа процессов модификации позволяют целенаправленно формировать различные типы градиентных топокомпозиатов с заданной структурой и составом покрытий, интерфейса и приповерхностных слоёв материала основы.

Ключевые слова: структурно-термодинамический подход, эффекты модификации, ионно-плазменная обработка, система «покрытие-интерфейс-основа», градиентные топокомпозиаты, интенсивность ионно-вакуумного воздействия.

© Коротаев Д.Н., Тарасов Е.Е., Полещенко К.Н., Теплоухов А.А., Семенюк Н.А., Орлов П.В., Чуранкин В.Г., Ласица А.М., 2022

Для цитирования

Совершенствование технологии послойного формирования наноструктурных топокомпозиатов методами ионно-вакуумной обработки на основе структурно-термодинамического подхода / Коротаев Д.Н., Тарасов Е.Е., Полещенко К.Н., Теплоухов А.А., Семенюк Н.А., Орлов П.В., Чуранкин В.Г., Ласица А.М. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №2. С. 107–119. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-107-119>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

IMPROVING THE TECHNOLOGY OF THE LAYER-BY-LAYER FORMATION OF NANOSTRUCTURED TOPOCOMPOSITES BY ION-VACUUM TREATMENT METHODS BASED ON A STRUCTURAL-THERMODYNAMIC APPROACH

Korotaev D.N.¹, Tarasov E.E.², Poleshchenko K.N.³, Teploukhov A.A.⁴, Semenyuk N.A.⁴, Orlov P.V.³, Churankin V.G.⁴, Lasitsa A.M.⁴

¹Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia

²Progress Federal Research and Production Center, Omsk, Russia

³Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

⁴Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The paper is relevant because it presents the development of a thermodynamic approach to managing the processes of the structural modification of surface and near-surface layers during the formation of nanostructured topocomposites. The main problem is the need for developing theoretical approaches applied to get a target control over the layer-by-layer ion-vacuum modifying processing, when creating nanostructured topocomposites. **Methods Applied.** The ideas of the structural-thermodynamic approach developed by the authors to the analysis of plasma processes are a theoretical basis of the study. Experimental results were obtained using methods of ion-plasma and ion-beam processing, as well as ion assistance with cascade cross effect. To apply an intermediate oxidized layer, the authors used such surface chemical modification methods as oxidation and passivation. We also used the methods of electron microscopy, probe microscopy, and scratch testing of the samples to study the morphology and adhesive properties of the coating-interface-base systems. **Originality.** We have developed a structural thermodynamic model that reveals the nature of modification effects in the coating-interface-base system at the micro-, submicro- and nanostructural levels caused by ion-plasma flows. The connection between thermodynamic parameters and technological modes of ion-vacuum treatment has been established to control the processes of the structural modification of surface and near-surface layers. The formation of quasi-wave multimodal nanostructures was detected. **Result.** The thermodynamic analysis of the structural modification showed that the formation of the gradient structure of topocomposites was determined by activation structural processes and controlled by the density of the energy flow and the reaction of the material to it, and dissipative ones by the intensity of energy and mass transfer in the modified surface of the material. The defining characteristic of forming the type of structural-phase states and their extent (depth) in the coating-interface-base system is energy imbalance between activation processes determined by a degree of ion-vacuum effect and dissipative phenomena of structural relaxation of the base material. **Practical Relevance.** The results of the structural and thermodynamic analysis of modification processes allow us to purposefully form various types of gradient topocomposites with a given structure and composition of coatings, interface and near-surface layers of the base material.

Keywords: structural-thermodynamic approach, modification effects, ion-plasma treatment, coating-interface-base system, gradient topocomposites, degree of ion-vacuum effect.

For citation

Korotaev D.N., Tarasov E.E., Poleshchenko K.N., Teploukhov A.A., Semenyuk N.A., Orlov P.V., Churankin V.G., Lasitsa A.M. Improving the Technology of the Layer-by-Layer Formation of Nanostructured Topocomposites by Ion-Vacuum Treatment Methods Based on a Structural-Thermodynamic Approach. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 2, pp. 107–119. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-2-107-119>

Введение

Возрастающие требования к ресурсу и надёжности технических систем, агрегатов, рабочих органов строительных, дорожных машин, обрабатывающему инструменту актуализируют проблематику работ, связанных с фундаментальными и прикладными исследованиями в об-

ласти разработки и получения функционально-градиентных материалов (ФГМ) [1–5]. Это обусловлено новыми возможностями решения технологических задач повышения комплекса эксплуатационных свойств изделий за счёт конструирования и получения градиентного строения поверхностных слоёв без изменения характеристик объёма материала.

Для создания ФГМ применяются различные методы высокоэнергетического воздействия, в том числе в различных комбинациях с технологиями термической обработки. Формирование ФГМ осуществляется на основе различных монолитных и порошковых материалов, в том числе титановых, алюминиевых сплавов, высокопрочных сталей, а также керамики и металлокерамических твёрдых сплавов.

Особый интерес представляет создание ФГМ повышенной износостойкости на основе слоистых, многослойных, мультислойных сверхтвёрдых и ультратвёрдых композиционных систем, в том числе наноразмерных, с использованием методов электронно-ионно-плазменных технологий [6–17].

Несмотря на достигнутые успехи в конструировании указанных материалов, остаются проблемы технологического характера, обеспечивающие решение задач эксплуатационного поведения изделий из ФГМ в условиях определяющего влияния адгезионно-усталостных и окислительных процессов. При этом главной проблемой снижения показателей их надёжности и ресурса остаётся негативное влияние внутренних напряжений в зонах концентраторов напряжений, расположенных, главным образом, в области интерфейса системы «покрытие-интерфейс-основа». Во многом это связано с используемыми технологическими решениями подготовки поверхности основы перед нанесением покрытий, не исключаящими в полной мере формирование дефектного слоя и его хаотического микрорельефа, что приводит к образованию концентраторов напряжений и растягивающим остаточным напряжениям в области интерфейса. Указанные причины определяются не всегда контролируемыми условиями теплового и механического воздействия, сопровождающего технологические операции подготовки поверхности перед нанесением покрытий, как, например, при предварительном шлифовании. В этом случае исключить наличие микроприжогов поверхности весьма проблематично.

Альтернативной заменой шлифовальных и полировальных технологических операций для подготовки поверхности основы является использование операции прецизионной ионно-плазменной обработки в сочетании с ионным ассистированием и нанесением ионно-вакуумных покрытий в едином цикле.

Указанный подход используется при создании нового типа функционально-градиентных

материалов – наноструктурных топокомпозиатов (НСТК), хорошо зарекомендовавших себя в различных условиях эксплуатации [3, 4, 18]. Градиентный характер НСТК позволяет в значительной степени нивелировать влияние концентраторов напряжений вследствие их структурно-морфологических особенностей. Это обусловлено тем, что наноструктурные топокомпозиаты создаются по типу многослойной композиции, сочетающей чередующиеся пластичные, дисперсно-армированные слои покрытий и поверхностный слой, содержащий конденсированную и кластерную фазы. Организованная по типу многофазной композиции с градиентным строением, уменьшающимся размером частиц покрытий в направлении поверхности и созданием верхнего слоя с пониженной сдвиговой устойчивостью, архитектура НСТК позволяет существенно повышать вязкость их разрушения, в том числе в условиях циклических воздействий при резании и фреттинг-изнашивании [19].

Кроме того, дополнительные возможности совершенствования технологии получения НСТК на стадии предварительной обработки перед нанесением покрытий открывают использование каскадного перекрёстного эффекта [20] как в направлении исследования процессов микро- и наноструктурных эффектов модифицирования граничных областей в системе «покрытие-интерфейс-основа», так и непосредственно в направлении исследования структурно-морфологических особенностей самого интерфейса. При этом реализация указанных возможностей требует разработки теоретических подходов, позволяющих целенаправленно управлять процессами послойной ионно-вакуумной модифицирующей обработки при создании наноструктурных топокомпозиатов.

Целью настоящей работы является совершенствование технологии послойного формирования НСТК методами ионно-вакуумной обработки на основе структурно-термодинамического подхода и исследования процессов структурной активации поверхности.

Методы и материалы исследования

В основу данного исследования положена идея управления процессами послойной модификации в условиях каскадного перекрёстного эффекта, реализуемого на модернизированной установке ННВ с использованием двух источников газоразрядной плазмы на основе дугового разряда, позволяющего генерировать плазму при

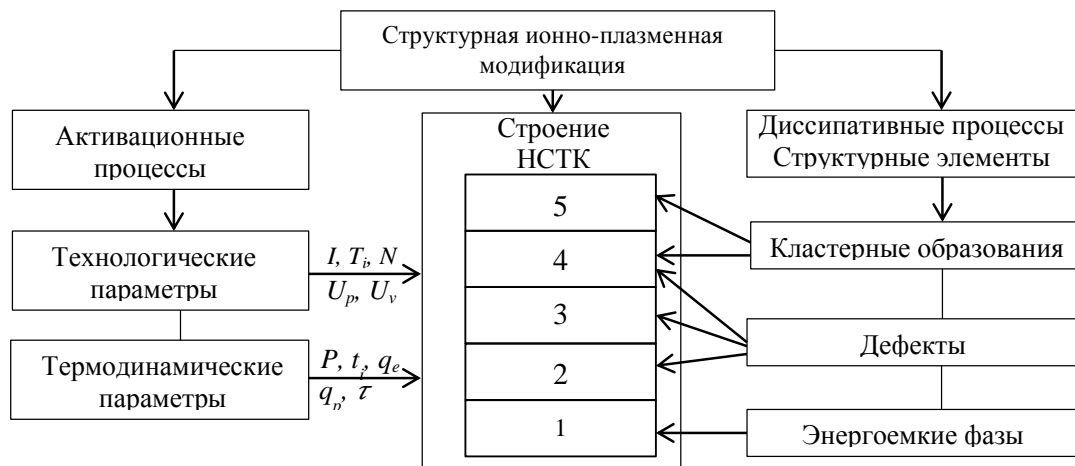


Рис. 2. Строение топокомпозиита на различных структурных уровнях ионно-плазменной модификации: I – сила тока ионного пучка; T_i – длительность импульса ионного пучка; N – частота импульсов; U_p – напряжение на подложке; U_V – ускоряющее напряжение; α – угол падения потоков ионов; P – давление; t – температура; q_e – плотность энергии; q_p – плотность мощности; τ – время энергетического воздействия; 1 – упрочненный слой (область эффекта дальнего действия); 2 – приповерхностный слой; 3 – переходный слой (область ионного перемешивания); 4 – покрытие (область конденсированной фазы); 5 – кластерная фаза

Fig. 2. The structure of the topocomposite at various structural levels of ion-plasma modification: I is current of the ion beam; T_i is the pulse duration of the ion beam; N is pulse frequency; U_p is voltage on the substrate; U_V is accelerating voltage; α is the angle of incidence of ion fluxes; P is pressure; t is temperature; q_e is energy density; q_p is power density; τ is energy deposition time; 1 is a hardened layer (a long-range effect region); 2 is a near-surface layer; 3 is a transition layer (an ion mixing region); 4 is a coating (a condensed phase region); 5 is a cluster phase

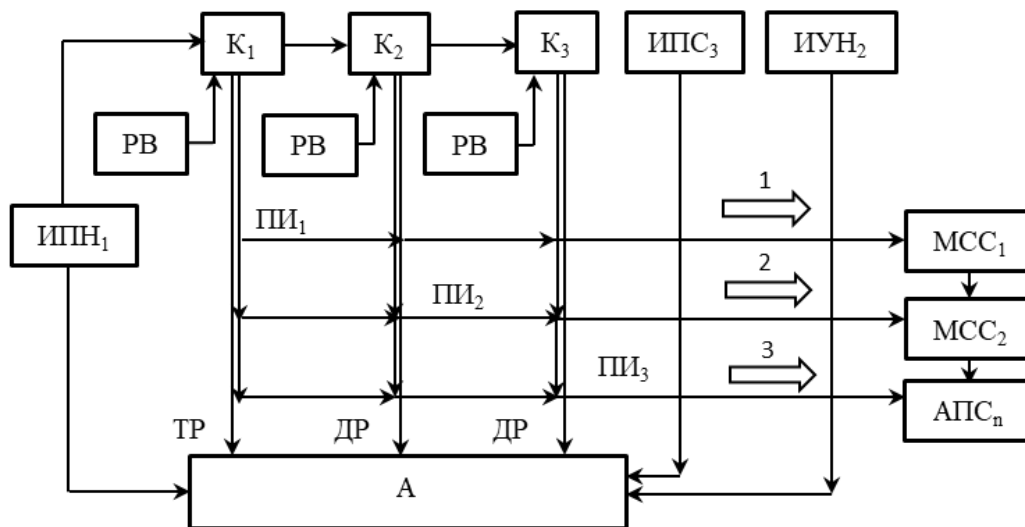


Рис. 3. Структурная схема получения наноструктурных топокомпозиитных покрытий вакуумной ионно-плазменной обработкой: ИПН₁ – источник постоянного напряжения; ИУН₂ – источник ускоряющего напряжения; ИПС₃ – источник потенциала смещения; ПВ – рабочее вещество (газ); ТР – тлеющий разряд; ДР – дуговой разряд; А – анод (обрабатываемый образец); К₁, К₂, К₃ – катоды; МСС₁, МСС₂ – метастабильные структуры; АПС_n – аморфноподобные структуры; ПИ₁, ПИ₂, ПИ₃ – потоки ионов, генерируемые соответствующими катодами; 1, 2, 3 – интенсивности соответствующих ионизированных потоков плазмы

Fig. 3. Block diagram of producing nanostructured topocomposite coatings by vacuum ion-plasma treatment. Designations: DCVS₁ is a DC voltage source; AVS₂ is an accelerating voltage source; DPS₃ is a displacement potential source; WS is a working substance (gas); GD is glow discharge; AD is arc discharge; A is an anode (the processed sample); К₁, К₂, К₃ are cathodes; MSS₁, MSS₂ – metastable structures; AS_n is amorphous-like structures; IF₁, IF₂, IF₃ are ion flows generated by the corresponding cathodes; 1, 2, 3 is intensity of the corresponding ionized plasma flows

Специфику послойного формирования наноструктурных топокомполитов можно рассмотреть на основе анализа двух конкурирующих процессов: активационных и диссипативных [22].

Для процесса взаимодействия энергетического потока с исходной структурой поверхности будет справедливо выражение

$$q_{э,п} \cdot t_{э,п} = q_{акт} \cdot t_{акт} + q_{дп} \cdot t_{дп}, \quad (1)$$

где $q_{э,п}$ – плотность энергетического потока; $t_{э,п}$ – время воздействия энергетического потока; $(q_{акт} \cdot t_{акт})$ – активационный энергетический поток; $(q_{дп} \cdot t_{дп})$ – диссипативный энергетический поток.

При этом формирование различных типов метастабильных структур MCC_1, MCC_2 , вплоть до аморфноподобных – $АПС_n$ (см. **рис. 3**), определяется величиной поглощённой внутренней энергии ΔU_{MCC} и будет зависеть от баланса активационного и диссипативного энергетических потоков, который можно описать выражением

$$\Delta U_{MCC} = q_{акт} \cdot t_{акт} - q_{дп} \cdot t_{дп}^* - q_{дп}^* \cdot t_{дп}^* \quad (2)$$

Произведение $(q_{дп} \cdot t_{дп})$ определяет диссипативную составляющую энергодисбаланса, имеющую диффузионную (тепловую) природу; $(q_{дп}^* \cdot t_{дп}^*)$ – диссипативную составляющую энергодисбаланса, связанную с микроструктурным энергомассопереносом.

Тогда выражение для величины поглощённой внутренней энергии выглядит следующим образом:

$$\Delta U_{MCC} = q_{акт} \cdot t_{акт} - D(T) \cdot \frac{dT_i}{dx_i} \cdot t_{дп} - q_{дп}^* \cdot t_{дп}^* \quad (3)$$

Поглощение внутренней энергии при ионно-плазменном модифицировании является результатом совместных физико-химических микроструктурных процессов, активность которых зависит от дисбаланса между активационными и диссипативными энергетическими потоками, развивающимися в обрабатываемом материале за счет внешнего энергетического воздействия. Полнота реализации активационных микроструктурных процессов управляется плотностью энергетического потока (плотностью мощности) и реакцией материала на него, а диссипативных – интенсивностью энергомассопереноса в приповерхностных слоях модифицируемого материала.

С уменьшением времени активного взаимодействия ионного разряда с материалом энергетический дисбаланс возрастает. Этот случай де-

монстрирует **рис. 4**, на котором приведены два варианта воздействия ионными разрядами, имеющими одинаковую продолжительность $t_{ПЭВ}$, но различные активационные периоды $t_{акт}$.

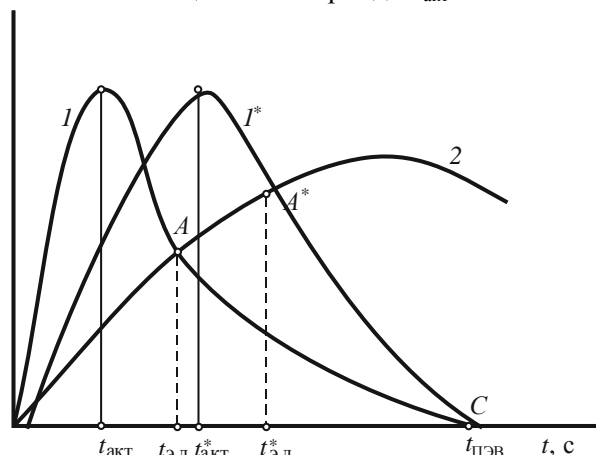


Рис. 4. Энергетические характеристики ИВПО при различных периодах активации (кривая 1 и 1*) разряда с металлом: $t_{акт}$ и $t_{акт}^*$ – разное время активационного периода ионно-плазменного воздействия ($t_{акт} < t_{акт}^*$);

$t_{э,п}$ и $t_{э,п}^*$ – время энергетического дисбаланса при разном активационном периоде; $t_{ПЭВ}$ – период энергетического воздействия; кривая 2 – развитие диссипативных процессов (процессов энергомассопереноса)

Fig. 4. Energy characteristics of IVPT at different activation periods (curve 1 and 1*) of the discharge with metal: $t_{акт}$ and $t_{акт}^*$ are different time of the activation period of ion-plasma exposure ($t_{акт} < t_{акт}^*$); $t_{э,п}$ and $t_{э,п}^*$ are time of energy imbalance at different activation periods; $t_{ПЭВ}$ is an energy deposition period; curve 2 is the development of dissipative processes (processes of energy and mass transfer)

На **рис. 5** приведены гипотетические зависимости плотности мощности энергетического потока q при активационном процессе (кривая 1), диссипативного процесса (кривая 2) и плотность потока энергетических затрат при дисбалансе (зона 3 и кривая 4). Плотность мощности разряда достигает максимума в конце начального активационного периода $t_{акт}$, а затем падает до нуля по истечении периода энергетического воздействия $t_{ПЭВ}$.

Дисбаланс энергетических потоков при ИВПО будет определяться площадью заштрихованной зоны 3, а временная зависимость плотности мощности энергетических затрат на нейтрализацию дисбаланса представлена кривой 4 как разницы ординат кривой 1 и 2 во временном диапазоне от 0 до $t_{э,п}$.

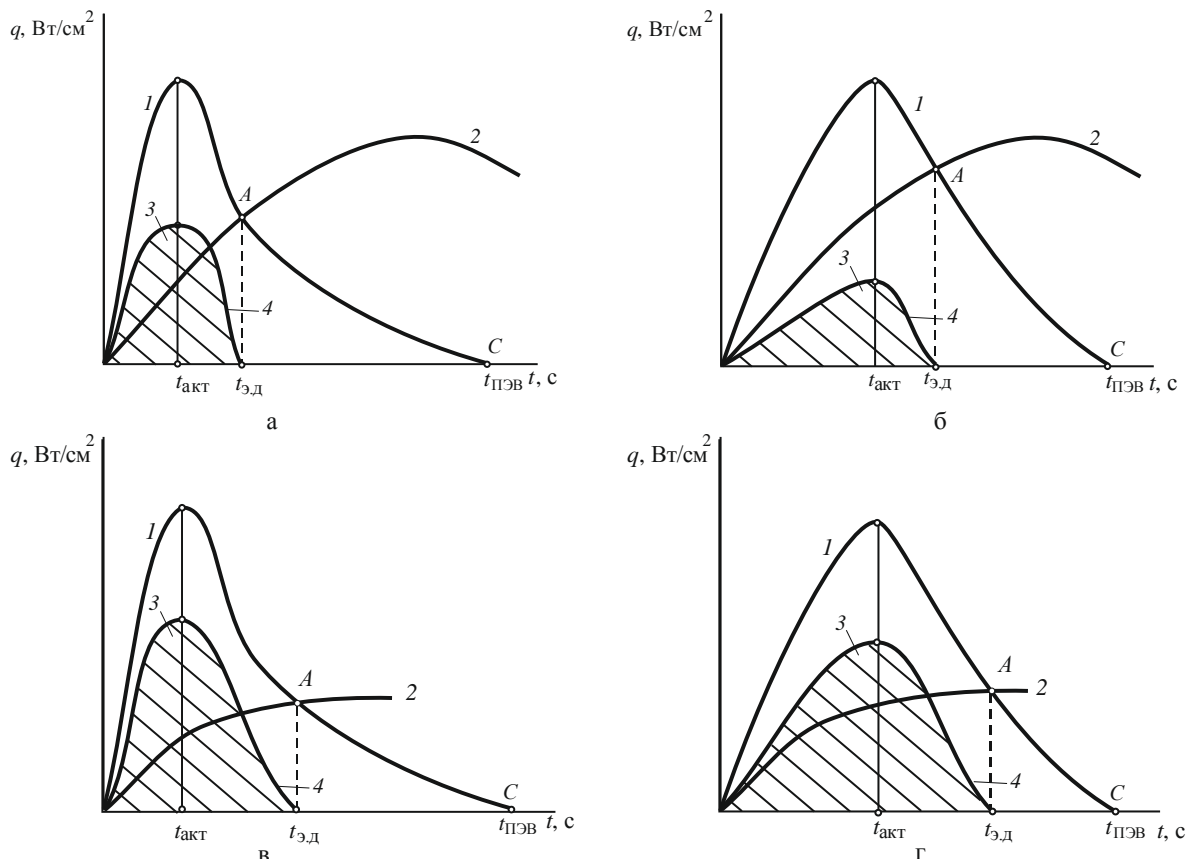


Рис. 5. Гипотетические зависимости изменения плотности мощности при активации и диссипации: а – при малом времени активационного периода и высокой интенсивности диссипативных процессов; б – при увеличении времени активационного периода и высокой интенсивности диссипативных процессов; в – при малом времени активации и низкой интенсивности диссипативных процессов; г – при увеличении времени активации и низкой интенсивности диссипативных процессов; 1 – плотность мощности ионного потока активационного процесса; 2 – плотность мощности потока диссипативного процесса; 3 – зона энергетических затрат при дисбалансе; 4 – кривая энергетического дисбаланса; $t_{акт}$ – время активационного периода; $t_{э,д}$ – время энергетического дисбаланса; $t_{ПЭВ}$ – период энергетического воздействия

Fig. 5. Hypothetical dependences between the change in power density during activation and dissipation: а is within a short activation period and high intensity of dissipative processes; б is within an increase in the activation period and high intensity of dissipative processes; в is within a short activation period and low intensity of dissipative processes; г is at an increase in the activation period and low intensity of dissipative processes; 1 is power density of the ion flux of the activation process; 2 is power density of the dissipative process flow; 3 is a zone of energy consumption in case of imbalance; 4 is an energy imbalance curve; $t_{акт}$ is an activation period; $t_{э,д}$ is time of energy imbalance; $t_{ПЭВ}$ is an energy deposition period

Анализируя рис. 5, приходим к заключению, что плотность потока энергетических затрат при дисбалансе (зона 3 и кривая 4) минимальна на рис. 5, б. То есть уменьшение плотности мощности q возможно при увеличении времени активационного процесса (активации) и повышении интенсивности диссипативных процессов (например, за счет энергомассопереноса).

При малом активационном периоде и повышении интенсивности диссипативных процессов энергомассопереноса время энергетического дисбаланса уменьшается и при этом увеличивается плотность мощности энергетического потока q . Энергетические затраты при таком варианте дис-

баланса минимальны (зона 3 на рис. 5, а).

Для оценки плотности мощности использовалось следующее выражение:

$$q_P = j \cdot U_{acc} \cdot f \cdot \tau \cdot N, \tag{4}$$

где j – плотность тока пучка, А/см²; U_{acc} – ускоряющее напряжение, В; f – частота следования импульсов, Гц; τ – длительность импульса, мкс; N – число импульсов пучка за время обработки.

В условиях каскадного перекрестного эффекта, в предположении аддитивности влияния энергетических потоков, плотность мощности может быть рассчитана по формуле

$$q_{P_K} = jU_{acc} \cdot f \cdot \tau \cdot N + 2q_P \cdot \cos\alpha. \quad (5)$$

После подстановки технологических параметров режимов ионно-плазменной обработки расчётные значения плотности мощности достигали порядка $q_{P_K} = 250\text{--}12000 \text{ Вт/см}^2$.

Из результатов проведенного структурно-энергетического анализа следует, что, варьируя значениями плотности мощности, наряду с изменением диссипативных свойств поверхностного слоя материала, можно целенаправленно управлять процессами послойного формирования структурно-фазового состояния наноструктурного топокомпозиата.

Анализ соотношения активационных и диссипативных процессов позволяет определить основные пути получения местастабильных структурных состояний поверхностных слоёв на каждом этапе формирования топокомпозиатов. Технологически они могут быть обеспечены следующим образом:

- активацией материала перед нанесением покрытий за счёт реализации каскадного перекрёстного эффекта;

- созданием условий для большего временного рассогласования между подводимой энергией ионного разряда и развитием диссипативных каналов, в том числе за счёт предварительного формирования слоёв с высокими диссипативными свойствами;

- повышением адгезионной прочности в системе «покрытие-интерфейс-основа» вследствие локализации (селективного воздействия) ионно-плазменных потоков и повышения значений их плотности мощности при нанесении покрытий в условиях ионного ассистирования.

В частности, этап предварительной ионно-плазменной обработки перед нанесением покрытий можно рассматривать не только в качестве технологической операции ионной очистки поверхности от загрязнений. В условиях каскадного перекрёстного эффекта этот этап можно рассматривать и в качестве модифицирующей обработки. В этом случае ионно-плазменная обработка будет способствовать развитию радиационно-индуцированных межфазных процессов в области межфазных границ и, в зависимости от значений плотности мощности, образованию точечных и протяжённых дефектов, субзёрненных границ, а также зёрненных конгломератов. Очевидно, что указанные структурные изменения

будут влиять на интенсивность диффузионного массопереноса в приповерхностных слоях и, соответственно, на диссипативные свойства материала основы [23]. Кроме того, эффективным «регулятором» диссипативных свойств системы «покрытие-интерфейс-основа» может являться формирование промежуточного слоя – элемента интерфейса из более пластичного слоя, чем материал основы, в частности, оксидного слоя.

На **рис. 6** представлены типичные профили поверхностей после предварительной ионно-плазменной обработки (**рис. 6, а**) и предварительного химического оксидирования с последующей ионно-плазменной обработкой в условиях каскадного перекрёстного эффекта (**рис. 6, б**).

Сравнительный анализ полученных изображений и соответствующих профилей поверхности показывает, что после предварительного химического оксидирования и последующей ионно-плазменной обработки в условиях каскадного перекрёстного эффекта происходит формирование квазиволновых мультимодальных наноразмерных структур, характеризующихся множеством чередующихся участков из «нановпадин» и «нановыступов», что свидетельствует об образовании более развитой в последнем случае удельной поверхности. Следует отметить, что полученные данные согласуются с развиваемыми авторами [32] положениями о предпочтительном характере формирования подобных мезоструктур на интерфейсе «поверхностный слой – подложка». Образование подобных структур способствует повышению адгезионной прочности связей в системе «покрытие-интерфейс-основа», о чём свидетельствуют данные скретч-тестирования образцов (**рис. 7**).

Из представленных зависимостей видно, что изменения в их характере определяются уменьшением угла наклона (**рис. 7, а, 1, 2, 3**), что свидетельствует о более равномерном виде поверхностного разрушения модифицированных поверхностей, что хорошо согласуется с данными исследования процесса разрушения (**рис. 7, б**).

Из представленных на **рис. 7** результатов видно, что по значениям сигналов акустической эмиссии разрушение покрытий TiN начинается уже при нагрузке около 3 Н и характеризуется его отслаиванием (см. **рис. 7, а**), в то время как для образцов с предварительно нанесённым оксидированным слоем разрушение в исследуемом диапазоне значений нормальной нагрузки, изнашивание происходит равномерно, без выраженных сколов и следов выкрашивания.

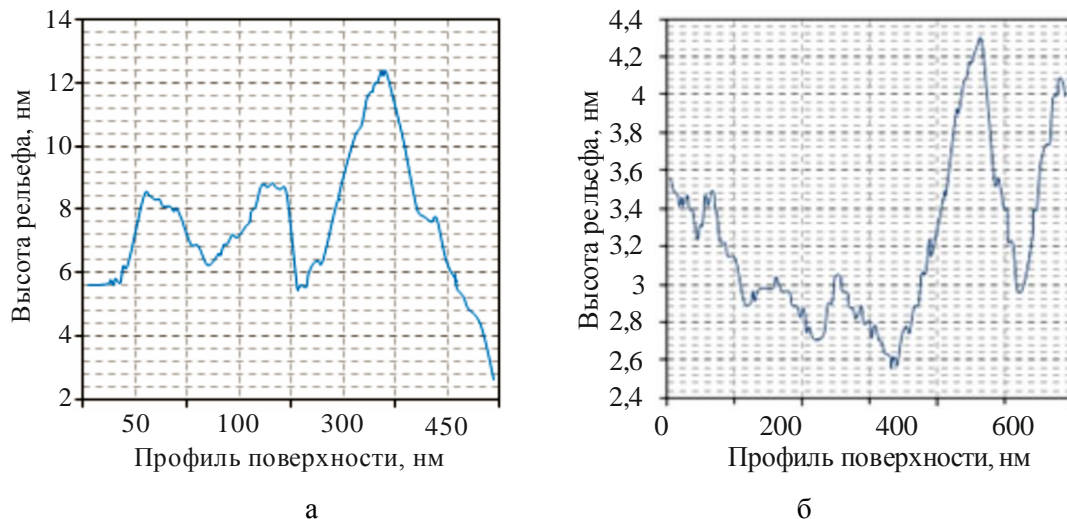


Рис. 6. АСМ-изображение профиля поверхности после ионно-плазменной обработки в условиях каскадного перекрёстного эффекта: а – без предварительного химического оксидирования; б – с предварительным химическим оксидированием
 Fig. 6. AFM image of the surface profile after ion-plasma treatment under the cascade cross effect: а is without a preliminary chemical oxidation; б is with a preliminary chemical oxidation

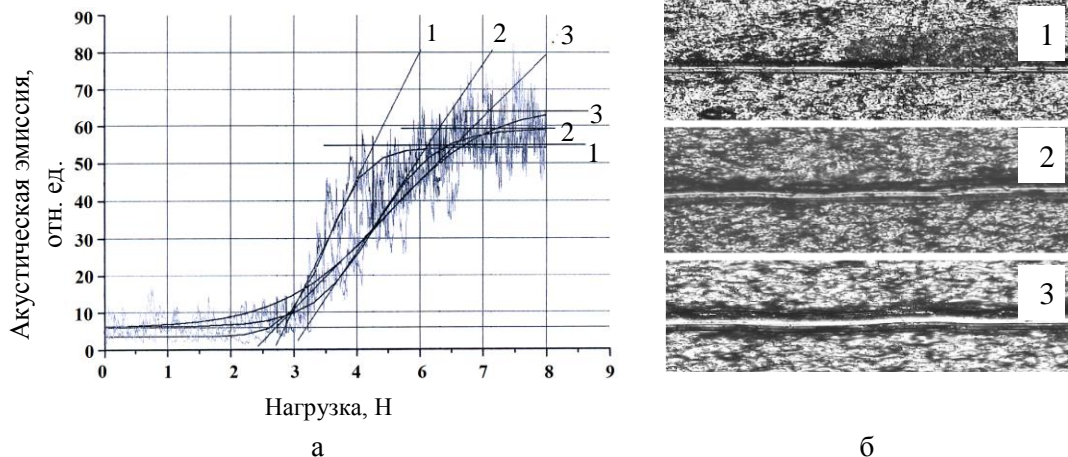


Рис. 7. Результаты скретч-тестирования образцов ВК8 с покрытием TiN после активации в условиях каскадного перекрёстного эффекта: а – зависимость акустической эмиссии от приложенной нагрузки; б – вид следа износа; 1 – при плотности мощности 250 Вт/см²; 2 – при плотности мощности 1000 Вт/см²; 3 – при плотности мощности 10000 Вт/см²
 Fig. 7. Scratch testing of samples BK8 coated with TiN after activation under the cascade cross effect: а is dependence between acoustic emission and applied load; б is a wear track; 1 is at 250 W/cm²; 2 is at 1000 W/cm²; 3 is at 10000 W/cm²

Заключение

В результате проведённых исследований установлено следующее. Теоретические положения структурно-термодинамического подхода к анализу ионно-вакуумных плазменных процессов послойного формирования наноструктурных топокомпозиатов, основанные на анализе баланса активационных и диссипативных процессов, позволяют найти соотношения между термодинамическими и технологическими параметрами для обработки в условиях каскадного перекрёст-

ного эффекта, а также определить основные направления совершенствования технологии получения данных материалов.

Проведённый термодинамический анализ свидетельствует о том, что плотность потока энергетических затрат в условиях дисбаланса активационных и диссипативных процессов минимальна при увеличении времени активационного процесса (активации) и повышении интенсивности диссипативных процессов энергомассопереноса. При малом активационном периоде и повышении интенсивности диссипативных

процессов энергопереноса время энергетического дисбаланса уменьшается. При этом увеличивается плотность мощности энергетического потока q . Кроме того, как следует из полученных расчётных оценок в условиях каскадного перекрёстного эффекта, уровень соответствующих значений q_{P_K} существенно возрастает, что даёт возможность формировать сильнонеравномерные структурно-фазовые состояния на каждом этапе формирования топокомпозиции.

Полученные результаты показывают, что одним из главных направлений совершенствования указанной технологии является наноконструирование области интерфейса системы «покрытие-интерфейс-основа» как за счёт использования возможностей процесса активации поверхности перед нанесением нитридотитанового покрытия, так и за счёт предварительного химического модифицирования с целью формирования пластичного оксидного слоя. Это позволяет обеспечить на стадии активации поверхности перед нанесением ионно-плазменных покрытий формирование квазиволновых мультимодальных наноразмерных структур, отличительной особенностью которых является наличие множества чередующихся участков из «нановпадин» и «нановыступов».

Образование подобных структур является наиболее предпочтительным с точки зрения повышения адгезионных связей, формирующихся в системе «покрытие-интерфейс-основа», что подтверждается экспериментальными данными стретч-тестирования образцов.

Очевидно, что формирование подобных структур в области интерфейса между покрытием и основой оказывает положительное влияние на снижение уровня внутренних напряжений в области зон концентраторов напряжений как за счёт развитой удельной поверхности, так и за счёт снижения сдвиговой устойчивости оксидных мезослоёв, выполняющих роль дополнительных локально-диссипативных структурных элементов.

Список литературы

1. Upadhyay R, Brossard N., Chen C.H. Mechanisms underlying astringency: introduction to an oral tribology approach // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2016, vol. 49, pp. 104003.
2. Matthews A., Franklin S., Holmberg K. Tribological coatings: contact mechanisms and selection // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2007, vol. 40, pp. 5463.
3. Градиентные структуры и далекодействующие поля напряжений, возникающие в перлитной стали при

ударном нагружении / Н.А. Попова, С.Г. Жулейкин, В.В. Коваленко и др. // *Современные проблемы прочности: науч. тр. VI Междунар. симпозиума им. В.А. Лихачева*, 20–24 октября 2003 г. Великий Новгород: НовГУ, 2003. Т. 1. С. 86–91.

4. Формирование и эволюция градиентных структурно-фазовых состояний в толстых сварных швах / В.В. Коваленко, В.П. Гагауз, В.В. Пискаленко и др. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2004. № 2. С. 103–110.
5. Васильев М.А., Прокопенко Г.И., Филатова В.С. Нанокристаллизация металлических поверхностей методами интенсивной пластической деформации // *Успехи физики металлов*. 2004. Т. 5, № 3. С. 345–399.
6. Будущее – за градиентными структурами и фазовыми состояниями в сталях и сплавах / В.В. Коваленко, С.В. Коновалов, В.Е. Громов и др. // *Всерос. науч.-практ. конф. «Металлургия: новые технологии, управление, инновации и качество»*. Новокузнецк: СибГИУ, 2005. С. 64–69.
7. Наноинженерия поверхности. Формирование неравновесных состояний в поверхностных слоях материалов методами электронно-ионно-плазменных технологий / отв. ред. Н.З. Ляхов, С.Г. Псахье. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 275 с.
8. Влияние ионно-пучковой обработки на структуру и трибомеханические свойства покрытий TiN / В.П. Сергеев, М.В. Федорищева, О.В. Сергеев и др. // *Физика и химия обработки материалов*. 2008. № 2. С. 10–13.
9. Phase Composition and Properties of Wear Resistant Ti–Al–Cr–Zr–Nb–N Coatings Manufactured by the Arc Physical Deposition Method / I.V. Blinkov, A.O. Volkhonskii, V.N. Anikin et al. // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2011. Vol. 2. № 3. Pp. 285–291.
10. High-performance wear-resistant ion-plasma coatings based on five-component nitrides for a hard-alloy cutting tool operating under constant loads / A.O. Volkhonskii, I.V. Blinkov, A.V. Elyutin et al. // *Metallurgist*. 2010. Vol. 54. Pp. 374–377.
11. Структурные изменения в многослойных нанопленках TiAl / К.О. Базалева, В.С. Крапошин, П.А. Цыганков и др. // *Материаловедение*. 2008. №4. С. 35–39.
12. Возможности метода вакуумной прокатки как способ получения нанослойных композитов с нанометрическими толщинами слоев / Л.И. Карпов, В.И. Внуков, К.Г. Волков и др. // *Материаловедение*. 2004. №1. С.48–53.
13. Курзина И. А. Наноразмерные интерметаллидные фазы, формирующиеся в условиях ионной имплантации // *Материаловедение*. 2010. № 2. С. 49–64.
14. Колесников А.Г., Плохих А.И. Конструкционные металлические материалы с субмикро- и наноразмерной структурой // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2010. № 5. С. 44–52.

15. Blinkov I.V., Volkhonsky A.O., Podstyzhonok O.B. Structure and properties of multilayer coatings deposited with pvd-arc technology // *Surface engineering*. 2011. No. 2. Pp. 57–63.
16. Upadhyay R, Brossard N., Chen C.H. Mechanisms underlying astringency: introduction to an oral tribology approach // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2016. Vol. 49. P. 104003.
17. Разработка и получение наноструктурных топоком-позитов / Гринберг П.Б., Коротаев Д.Н., Поleshchenko К.Н. и др. // *Вестник СибАДИ*. 2015. № 3(43). С. 39–45.
18. Метод получения наноструктурированных топоком-позитов для повышения несущей способности конструктивных элементов энергооборудования / Гринберг П. Б., Поleshchenko К. Н., Горюнов В. Н. и др. // *Вестник Омского университета*. 2012. № 2. С. 253–258.
19. Nanostructured titanium coatings for parts operating under conditions of fretting-corrosion / D.N. Korotaev E.N. Eremin K.N. Poleschenko et al. // *AIP Conference Proceedings*. 2141. 2019. P. 040019. <https://doi.org/10.1063/1.5122138>
20. Receiving nanostructural topocomposite coatings in terms of the cascade cross effect / P.B. Grinberg, K.N. Poleschenko, D.N. Korotaev, et al. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. P. 012054. DOI:10.1088/1742-6596/1210/1/012054.
21. Формирование наноструктурных топоком-позитов с кластерно-градиентной архитектурой комбинированной ионно-вакуумной обработкой / Поleshchenko К.Н., Коротаев Д.Н., Ерёмин Е.Н., Несов С.Н., Тарасов Е.Е., Теплоухов А.А., Семенюк Н.А., Иванова Е.В., Ласица А.М., Иванов А.Л. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2021. Т.19. №2. С. 68–78. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-68-78>
22. Ким В.А., Коротаев Д.Н., Соловьев В.В. Термодинамика упрочняющих технологий // *Известия Амурского государственного университета*. 1999. №6. С. 32–35.
23. Mass transfer in heterogeneous materials under irradiation with high-intensity beams of charged particles / Vershinin G.A., Poleshchenko K.N., Povoroznyuk S.N. et al. // *Surface Investigation*. 2001. V. 16. P. 761–767.
4. Kovalenko V.V., Gagauz V.P., Piskalenko V.V. et al. Forming and evolving gradient structural phase states in thick welding seams. *Fundamentalnye problemy sovremenogo materialovedeniya* [Basic Problems of Modern Materials Science], 2004, no. 2, pp. 103–110. (In Russ.)
5. Vasilev M.A., Prokopenko G.I., Filatova V.S. Nanocrystallizing metal surfaces by severe plastic deformation methods. *Uspekhi fiziki metallov* [Advances in Physics of Metals], 2004, vol. 5, no. 3, pp. 345–399. (In Russ.)
6. Kovalenko V.V., Kononov S.V., Gromov V.E. et al. Future belongs to gradient structures and phase states in steels and alloys. *Vseros. nauch.-prakt. konferentsiya «Metallurgiya: novye tekhnologii, upravlenie, innovatsii i kachestvo»* [All-Russian Scientific and Practical Conference "Metallurgy: new technologies, management, innovation and quality"]. Novokuznetsk: Siberian State Industrial University, 2005, pp. 64–69. (In Russ.)
7. *Nanoinzheneriya poverkhnosti. Formirovanie neravnovesnykh sostoyaniy v poverkhnostnykh sloyakh materialov metodami elektronno-ionno-plazmennyykh tekhnologiy* [Surface nanoengineering. Formation of non-equilibrium states in the surface layers of materials by methods of electron-ion-plasma technologies]. Ed. by Lyakhov N.Z., Psakhie S.G. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2008, 275 p. (In Russ.)
8. Sergeev V.P., Fedorishcheva M.V., Sergeev O.V. et al. Effect of ion-beam treatment on the structure and tribomechanical properties of TiN coatings. *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and Chemistry of Materials Processing], 2008, no. 2, pp.10–13. (In Russ.)
9. Blinkov I.V., Volkhonskii A.O., Anikin V.N. et al. Phase composition and properties of wear resistant Ti–Al–Cr–Zr–Nb–N coatings manufactured by the arc physical deposition method. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2011, vol. 2, no. 3, pp. 285–291.
10. Volkhonskii A.O., Blinkov I.V., Elyutin A.V. et al. High-performance wear-resistant ion-plasma coatings based on five-component nitrides for a hard-alloy cutting tool operating under constant loads. *Metallurgist*, 54, 374–377 (2010).
11. Bazaleeva K.O., Kraposhin V.S., Tsygankov P.A. et al. Structural changes in TiAl multi-layer nanofilms. *Materialovedenie* [Materials Science], 2008, no. 4, pp. 35–39. (In Russ.)
12. Karpov L.I., Vnukov V.I., Volkov K.G. et al. Potential of the vacuum rolling method as a technique for producing nanolayer composites with nanometer thicknesses of layers. *Materialovedenie* [Materials Science], 2004, no. 1, pp. 48–53. (In Russ.)
13. Kurzina I.A. Nanoscale intermetallic phases forming during ion implantation. *Materialovedenie* [Materials Science], 2010, no. 2, pp. 49–64. (In Russ.)

References

1. Upadhyay R., Brossard N. and Chen C.H. Mechanisms underlying astringency: introduction to an oral tribology approach. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 49, 104003 (2016).
2. Matthews A., Franklin S. and Holmberg K. Tribological coatings: contact mechanisms and selection. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 40, 5463 (2007).
3. Popova N.A., Zhuleikin S.G., Kovalenko V.V. et al. Gradient structures and long-range fields of stresses occurring in pearlitic steel at impact load. *Sovremennye problemy prochnosti: nauch. trudy VI Mezhdunar. simpoziuma im. V.A. Likhacheva* [Modern problems of

14. Kolesnikov A.G., Plokhikh A.I. Structural metallic materials with a submicro- and nanoscale structure. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Priborostroenie* [Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series: Instrumentation], 2010, no. 5, pp. 44–52. (In Russ.)
15. Blinkov I.V., Volkhonsky A.O. and Podstyzhonok O.B. Structure and properties of multilayer coatings deposited with PVD-ARC technology. *Surface engineering*, 2, 57–63 (2011).
16. Upadhyay R., Brossard N. and Chen C.H. Mechanisms underlying astringency: introduction to an oral tribology approach. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 49, 104003 (2016).
17. Grinberg P.B., Korotaev D.N., Poleschenko K.N. et al. Developing and producing nanostructured topocomposites. *Vestnik SibADI* [The Russian Automobile and Highway Industry Journal], 2015, no. 3(43), pp. 39–45. (In Russ.)
18. Grinberg P.B., Poleschenko K.N., Goryunov V.N. et al. The method for producing nanostructured topocomposites to increase load capacity of structural elements of power equipment. *Vestnik Omskogo universiteta* [Bulletin of Omsk University], 2012, no. 2, pp. 253–258. (In Russ.)
19. Korotaev D.N., Eremin E.N., Poleschenko K.N. et al. Nanostructured titanium coatings for parts operating under conditions of fretting-corrosion. AIP Conference Proceedings, 040019 (2019). <https://doi.org/10.1063/1.5122138>
20. Grinberg P.B., Poleschenko K.N., Korotaev D.N. et al. Receiving nanostructural topocomposite coatings in terms of the cascade cross effect. *Journal of Physics: Conference Series*, 012054 (2019). DOI:10.1088/1742-6596/1210/1/012054
21. Poleschenko K.N., Korotaev D.N., Eremin E.N., Nesov S.N., Tarasov E.E., Teploukhov A.A., Semenyuk N.A., Ivanova E.V., Lasitsa A.M., Ivanov A.L. Formation of nanostructured topocomposites with cluster-gradient architecture by combined ion-vacuum processing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2021, vol. 19, no. 2, pp. 68–78. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-68-78>
22. Kim V.A., Korotaev D.N., Solovov V.V. Thermodynamics of hardening technologies. *Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Amur State University], 1999, no. 6, pp. 32–35. (In Russ.)
23. Vershinin G.A., Poleschenko K.N., Povoroznyuk S.N. et al. Mass transfer in heterogeneous materials under irradiation with high-intensity beams of charged particles. *Surface Investigation*, 16, 761–767 (2001).

Поступила 18.04.2022; принята к публикации 11.05.2022; опубликована 28.06.2022
Submitted 18/04/2022; revised 11/05/2022; published 28/06/2022

Коротаев Дмитрий Николаевич – доктор технических наук, профессор,
Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе,
Москва, Россия. Email: korotaevd99@mail.ru. ORCID 0000-0002-5957-4135

Тарасов Евгений Евгеньевич – инженер-технолог,
Федеральный научно-производственный центр «Прогресс», Омск, Россия.
Email: tarasov_ee@mail.ru

Полещенко Константин Николаевич – доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник научно-исследовательского отдела,
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), Омск, Россия.
Email: k_poleschenko@mail.ru. ORCID 0000-0002-8623-4777

Теплоухов Андрей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: a.a.lektor@mail.ru. ORCID 0000-0002-5649-2871

Семенюк Наталья Андреевна – кандидат технических наук, доцент,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: sem-natal@mail.ru. ORCID 0000-0003-0103-7684

Орлов Павел Викторович – кандидат технических наук, начальник НИО,
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), Омск, Россия.
Email: orlov-pv@mail.ru

Чуранкин Вячеслав Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: vgchurankin@omgtu.ru. ORCID 0000-0002-6031-1340

Ласица Александр Михайлович – кандидат технических наук, доцент,
Омский государственный технический университет, Омск, Россия.
Email: lasitsa@mail.ru. ORCID 0000-0002-7187-6400

Dmitriy N. Korotaev – DrSc (Eng.), Professor, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia.
Email: korotaevd99@mail.ru. ORCID 0000-0002-5957-4135

Evgeniy E. Tarasov – Process Engineer,
Progress Federal Research and Production Center, Omsk, Russia.
Email: tarasov_ee@mail.ru

Konstantin N. Poleshchenko – DrSc (Eng.), Professor, Chief Researcher of the Research Department, Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia.
Email: k_poleshenko@mail.ru. ORCID 0000-0002-8623-4777

Andrey A. Teploukhov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: a.a.lektor@mail.ru. ORCID 0000-0002-5649-2871

Natalya A. Semenyuk – PhD (Eng.), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: sem-natal@mail.ru. ORCID 0000-0003-0103-7684

Pavel V. Orlov – PhD (Eng.), Head of the Research Department,
Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia.
Email: orlov-pv@mail.ru

Vyacheslav G. Churankin – PhD (Eng.), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: vgchurankin@omgtu.ru. ORCID 0000-0002-6031-1340

Aleksandr M. Lasitsa – PhD (Eng.), Associate Professor,
Omsk State Technical University, Omsk, Russia.
Email: lasitsa@mail.ru. ORCID 0000-0002-7187-6400