



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.793

DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-68-78

## ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРНЫХ ТОПОКОМПОЗИТОВ С КЛАСТЕРНО-ГРАДИЕНТНОЙ АРХИТЕКТУРОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ИОННО-ВАКУУМНОЙ ОБРАБОТКОЙ

Полещенко К.Н.<sup>1</sup>, Коротаев Д.Н.<sup>2</sup>, Ерёмин Е.Н.<sup>3</sup>, Несов С.Н.<sup>3</sup>, Тарасов Е.Е.<sup>4</sup>, Теплоухов А.А.<sup>3,5</sup>, Семенюк Н.А.<sup>3</sup>, Иванова Е.В.<sup>2</sup>, Ласица А.М.<sup>3</sup>, Иванов А.Л.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Омск, Россия

<sup>2</sup>Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Россия

<sup>3</sup>Омский государственный технический университет, Омск, Россия

<sup>4</sup>Федеральный научно-производственный центр «Прогресс», Омск, Россия

<sup>5</sup>ООО «Омсктехуглерод», Омск, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** Многообразие различных видов поверхностной повреждаемости материалов в условиях эксплуатации машин и механизмов актуализируют фундаментальные и прикладные исследования по созданию новых износостойких материалов. Совершенствование наноструктурных топокомпозигов за счёт создания дополнительных локально-диссипативных структурных элементов является наиболее перспективным направлением создания нового типа наноструктурных топокомпозигов с кластерно-градиентной архитектурой. **Используемые методы.** Использовалась усовершенствованная установка, позволяющая осуществлять ионно-плазменную и ионно-лучевую обработку в условиях дискретного и изменяющегося фронта наращивания. **Новизна.** Проведены исследования эволюции строения покрытий в зависимости от условий ионно-вакуумной обработки. Установлены эффекты «расслоения» кластерной фазы и текстурирования конденсированной фазы при ионно-плазменном напылении. Проведена апробация технологических решений, сочетающих селективную ионную обработку, ионное ассистирование и напыление покрытия для формирования требуемого строения поверхности топокомпозигов. Исследовано изменение фазового состава покрытия по глубине. **Результат.** Установлено, что при комбинированной ионно-вакуумной обработке происходит образование в области границы раздела «покрытие-основа» оксинитридов титана. Приведены результаты исследований формирования наноструктурных топокомпозигов с кластерно-градиентной архитектурой. **Практическая значимость.** Показано, что наличие данных фаз, наряду с кластерной морфологией топокомпозигов, является положительным фактором, способствующим повышению износостойкости в жестких условиях температурно-скоростного нагружения при резании труднообрабатываемого никелевого сплава.

**Ключевые слова:** ионно-плазменная обработка, ионно-лучевая обработка, наноструктурные топокомпозиты с кластерно-градиентной архитектурой, кластерная фаза, нанокластерная морфология.

© Полещенко 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., 2021

### Для цитирования

Формирование наноструктурных топокомпозигов с кластерно-градиентной архитектурой комбинированной ионно-вакуумной обработкой / Полещенко 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>



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

# FORMATION OF NANOSTRUCTURED TOPOCOMPOSITES WITH CLUSTER-GRADIENT ARCHITECTURE BY COMBINED ION-VACUUM PROCESSING

Poleshchenko K.N.<sup>1</sup>, Korotaev D.N.<sup>2</sup>, Eremin E.N.<sup>3</sup>, Nesov S.N.<sup>3</sup>, Tarasov E.E.<sup>4</sup>, Teploukhov A.A.<sup>3,5</sup>, Semenyuk N.A.<sup>3</sup>, Ivanova E.V.<sup>2</sup>, Lasitsa A.M.<sup>3</sup>, Ivanov A.L.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

<sup>2</sup> Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Omsk State Technical University, Omsk, Russia

<sup>4</sup> Federal Research and Production Center Progress, Omsk, Russia

<sup>5</sup> LLC Omsk Carbon Group, Omsk, Russia

**Abstract. Problem Statement (relevance of the research).** The variety of different types of surface damage to materials in the operation of vehicles and mechanisms contributes to current relevance of basic and applied research on the creation of new wear-resistant materials. Improving the nanostructured topocomposites by creating additional, locally dissipative structural elements is the most promising direction for creating a new type of nanostructured topocomposites with cluster-gradient architecture. **Methods Applied.** An improved unit was used to carry out ion-plasma and ion-beam processing under conditions of a discrete and varying front. **Novelty.** Studies of the evolution of the coating structure were carried out depending on the conditions of ion-vacuum processing. The authors established the effects of "stratification" of the cluster phase and texturing of the condensed phase during ion-plasma sputtering. They tested the technological solutions combining selective ion processing, ion assistance and coating deposition to form the required topocomposite surface structure. The change in the coating phase composition along depth was studied. **Result.** It was found that during combined ion-vacuum processing, titanium oxynitrides are formed in the "coating-base" interface. This paper presents results of the formation of nanostructured topocomposites with cluster-gradient architecture. **Practical significance.** It is shown that these phases along with the cluster morphology of topocomposites are positive factors contributing to an increase in wear resistance under severe conditions of temperature-dynamic loading, when cutting a difficult-to-machine nickel alloy.

**Keywords:** ion-plasma processing, ion-beam processing, nanostructured topocomposites with cluster-gradient architecture, cluster phase, nanocluster morphology.

## For citation

Poleshchenko 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. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-2-68-78>

## Введение

Повышение поверхностной прочности материалов продолжает оставаться одной из главных проблем физического материаловедения, трибологии и трибофизики. Многообразие различных видов поверхностной повреждаемости материалов вследствие пластической деформации, адгезионно-усталостных процессов, абразивного изнашивания, микрорезания, фреттинг-разрушения, их взаимовлияние в условиях эксплуатации машин и механизмов актуализируют фундаментальные и прикладные исследования по созданию новых износостойких материалов. К числу отечественных трендов в этой области относятся направления, связанные с разработкой различных типов архитектуры одно-, многослойных и мультислойных наноразмерных покрытий [1–6], а также сверхтвёрдых и ульт

тратвёрдых покрытий с нанокompозитной архитектурой [7].

Для данных условий успешно проведена апробация изделий на основе наноструктурных топокомпозитных покрытий или наноструктурных топокомпозитов (НСТК) [8–13]. Вместе с тем проведённые исследования позволили определить возможные пути совершенствования технологии их получения, основанной, в частности, на использовании каскадного перекрёстного эффекта [14], а также расширить технологические возможности получения данных материалов с регулируемой морфологией. Несмотря на достигнутые успехи в создании указанных покрытий, задачи обеспечения надёжности и долговечности конструкционных и инструментальных материалов для таких условий, как фреттинг-разрушение и окислительный износ при резании особопрочных сплавов, остаются нерешёнными.

Это связано в первую очередь с недостаточной циклической прочностью и стойкостью к окислительным процессам существующих защитных покрытий [15, 16].

Перспективы применения НСТК обусловлены их способностью эффективно диссипировать энергию трибовзаимодействия за счёт специфики структурно-морфологического строения поверхности и приповерхностных слоёв с изменяющейся (градиентной) структурой по глубине. Структурные элементы, эффективно диссипирующие энергию трибоконтакта, – это в первую очередь нанокластеры. За счёт проявления механизмов нанопластичности при их сдвиге и повороте, а также наличия переходных мезослоёв между покрытием и основой удаётся значительно минимизировать развитие трещин в поверхностных слоях в начальный период трения [13]. Таким образом, совершенствование НСТК за счёт создания дополнительных локально-диссипативных структурных элементов является наиболее перспективным направлением создания нового типа НСТК, а именно – наноструктурных топокомпози́тов с кластерно-градиентной архитектурой (КГА).

Помимо указанных структурных элементов наибольший интерес для решения задач диссипации энергии в условиях трибонагружения вызывает формирование интерфейса «поверхностный слой – подложка», обеспечивающего протекание процессов релаксационной деформации без разрушения, возникающих в зонах концентраторов напряжений (ЗКН) [14, 17, 18]. Это показывает целесообразность формирования подобных структурных состояний в области межфазной границы между покрытием и основой, что позволит снизить уровень внутренних напряжений в области ЗКН за счёт создания субструктурных состояний как в материале основы, так и в покрытии. Теоретически задача сводится к снижению масштаба ЗКН на границе раздела «упрочнённый слой – покрытие». Технологически это можно обеспечить путём предварительного наноструктурирования верхних слоёв материала основы, а также созданием условий для формирования развитой удельной поверхности и контролируемого образования и роста на ней наноразмерных зародышей покрытия.

Вместе с тем в области интерфейса целесообразно сформировать энергоёмкие фазы по типу оксикаридов и оксинитридов, обладающих высокой пассивирующей способностью. Наличие указанных фаз в условиях последующей трибоактивации может способствовать образованию вторичных кислородосодержащих износостойких

структур в результате эффекта структурно-энергетической приспособляемости [19–22].

Дополнительное влияние на структурную (структурно-энергетическую) приспособляемость НСТК может оказывать и проявление установленного ранее эффекта дальнего действия [23] в результате трансформации их приповерхностных слоёв с образованием дислокационных фрагментов, слоистых или периодических структур.

Следовательно, задача получения НСТК с кластерно-градиентной архитектурой сводится в первую очередь к управлению процессами формирования требуемой нанокластерной морфологии при модифицирующем воздействии, направленном на формирование локально-неравновесных (метастабильных) поверхностных структур, подобных по своему строению вторичным структурам и быстро адаптируемым к последующему трибомеханическому воздействию. Целью настоящей работы является исследование процессов формирования наноструктурных топокомпози́тов с кластерно-градиентной архитектурой при комбинированной ионно-вакуумной обработке в условиях дискретного и изменяющегося фронта наращивания покрытий.

### Методы и материалы

В основу технологии получения наноструктурных топокомпози́тов с кластерно-градиентной архитектурой положена идея управления процессами направленной кристаллизации конденсированной и кластерной фаз за счёт меняющегося и дискретного фронта наращивания покрытия. Для реализации этой идеи была проведена модернизация установки ННВ путём совершенствования источника газоразрядной плазмы на основе дугового разряда, позволяющего генерировать плазму при рабочих давлениях порядка  $P = 10^{-2} \div 10^{-1}$  Па, а также дополнительного использования импульсного имплантера. Это позволило обеспечить вариативность режимов ионно-плазменных процессов, а также в зависимости от решаемых задач осуществлять этапы активации и пассивации при соответственно обработке поверхности материала основы и формировании покрытий в одном вакуумном цикле.

Схема, используемая в эксперименте, приведена на **рис. 1**. Данная схема позволяет осуществлять многооперационную обработку ионно-плазменными потоками в стационарном и импульсном режимах, а также управлять процессами формирования нанокластерной морфологии за счёт меняющегося и дискретного фрон-

та наращивания. Это достигается путём изменения угла наклона ионно-плазменного потока относительно поверхности образца, а также селективной обработки материала основы с использованием специального приспособления, которое содержит поворотный стол для изменения положения образца относительно направления потоков ионов в пределах угла  $\alpha=0 \div 70^\circ$ , отражатель специальной конструкции и шаблон.

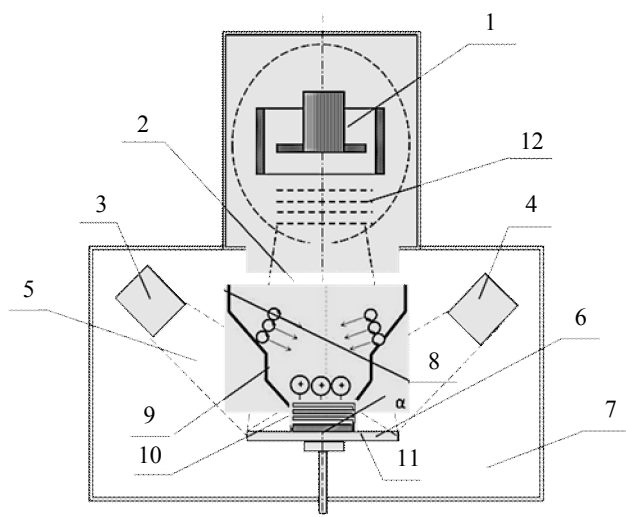


Рис. 1. Схема получения НСТК с КГА: 1 – имплантер; 2 – пучок ионов; 3 – испаритель 1-й; 4 – испаритель 2-й; 5 – поток ионов; 6 – поворотный стол (держатель образцов); 7 – вакуумная камера; 8 – поток ионов; 9 – отражатель ионов; 10 – шаблон; 11 – образец; 12 – сетка;  $\alpha$  – угол наклона поворотного стола (держателя образцов)

Fig. 1. Flow chart of nanostructured topocomposites with cluster-gradient architecture: 1 is an implanter; 2 is an ion beam; 3 is an evaporation tank 1; 4 is an evaporation tank 2; 5 is an ion flow; 6 is a rotary table (sample holder); 7 is a vacuum chamber; 8 is an ion flow; 9 is an ion reflector; 10 is a template; 11 is a sample; 12 is a grid;  $\alpha$  is a tilt angle of the rotary table (sample holder)

Апробация технологии получения НСТК проводилась на образцах различных марок сталей и сплавов. В данной работе приведены результаты для получения НСТК с кластерно-градиентной архитектурой на основе металллокерамического твердого сплава ВК-8, полученного методом порошковой металлургии. Основные исследования были проведены с использованием катодов, позволяющих получать покрытия из газоразрядной нитридотитановой плазмы. В качестве рабочего вещества использовался азот. Материал катода – ВТ5. В зависимости от задач,

решаемых в процессе вакуумного цикла, назначались соответствующие режимы обработки, которые варьировались в следующих диапазонах. Ускоряющее напряжение в условиях ионного ассистирования изменялось в пределах  $U_p = 1 \div 40$  kV. Сила тока ионного пучка:  $I = 10 \div 30$  mA. Длительность импульса ионного пучка:  $T_i = 100 \div 150$   $\mu$ s. Частота импульсов менялась в пределах  $N = 1 \div 100$  Hz. В режиме ионно-плазменного нанесения покрытий напряжение на подложке изменялось в пределах  $U_p = 80 \div 120$  V.

Для исследования процессов эволюции строения морфологии и структуры покрытий использована комбинация методов электронной и зондовой микроскопии на электронном микроскопе JEOL JCM-5700 с рентгеновским энергодисперсионным спектрометром JED-2300 и атомно-силовом микроскопе NTEGRA Prima (NT-MDT). Исследование элементного состава покрытий проводилось методом рентгенофотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на аналитическом комплексе Surface Science Center (Riber). Оценка износостойкости НСТК с кластерно-градиентной архитектурой проводилась в условиях резания.

## Результаты и обсуждение

Анализ процессов формирования НСТК с кластерно-градиентной архитектурой при ионно-плазменном воздействии проводился с учётом специфики конструктивных особенностей катодной системы установки. С использованием данной конструкции были реализованы два основных варианта обработки. Первый вариант использовался для операций напыления с использованием испарителей и источника постоянного напряжения. Второй вариант применялся для селективного распыления, ионного ассистирования, а также реализации каскадно-перекрёстного эффекта. Во втором варианте напыления был задействован испаритель и имплантер, а также источники постоянного, ускоряющего напряжения и источник с потенциалом смещения напряжения. В зависимости от варианта и режимов ионно-плазменной обработки осуществлялось формирование требуемой нанокластерной морфологии в условиях меняющегося и дискретного фронта наращивания покрытия.

На рис. 2 приведены профили поверхности после предварительного наноструктурирования в режиме ионного ассистирования без селективной обработки (рис. 2, а) и с использованием селективной обработки (рис. 2, б).



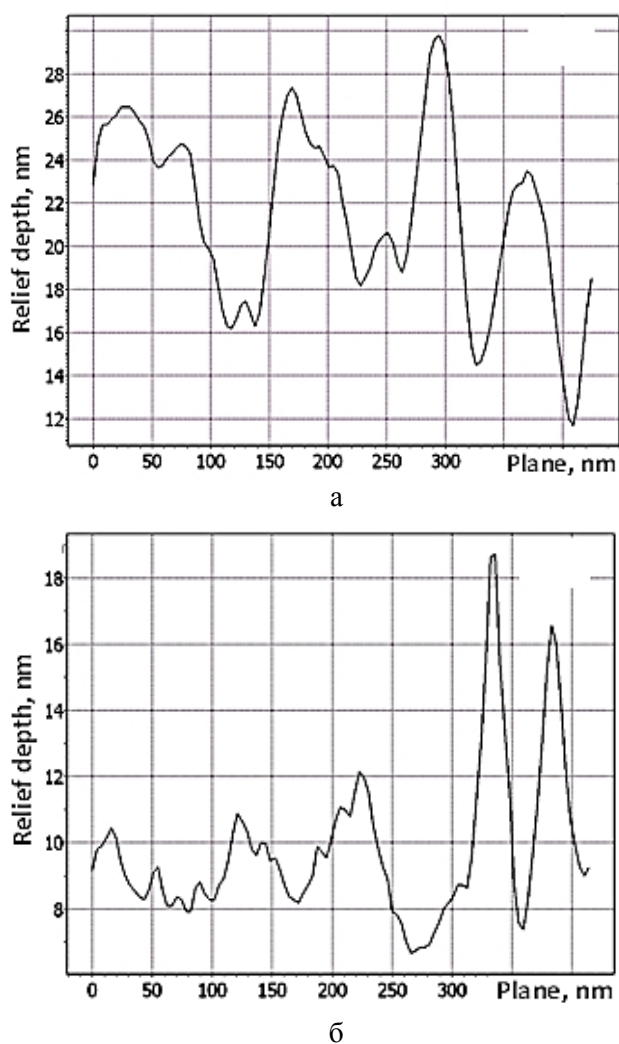


Рис. 2. Вид поверхности материала основы – сплава ВК-8 после наноструктурирования в режиме ионного ассистирования: а – без селективной обработки; б – с использованием селективной обработки

Fig. 2. Surface of the base material – BK-8 alloy after nanostructuring by ion-beam-assisted deposition: a is without selective treatment; б is with selective treatment

Из представленных зависимостей видно, что селективная обработка позволяет получить более развитую удельную поверхность, о чём свидетельствует появление «бокового рельефа» в виде маленьких пиков – высот нанонеровностей (см. рис. 2, б).

После предварительного наноструктурирования были проведены исследования начальных стадий образования покрытий в течение 3, 6, 9 мин. Было установлено, что при использовании предварительного наноструктурирования

развитие структуры покрытия может происходить по двум механизмам: островковому и смешанному. При островковом механизме роста покрытия происходит образование преимущественно конденсированной фазы, при смешанном механизме наряду с ростом конденсированной фазы, обеспечивающей равномерное развитие покрытия, наблюдается преимущественно вертикальный рост кластерных агломератов (кластерной фазы). Такой тип строения покрытия происходит в тех случаях, когда предварительное наноструктурирование осуществляется за счет одновременной селективной ионно-плазменной и ионно-лучевой обработки с использованием шаблонов. Тем самым создаются условия для активации локальных участков поверхности, служащих в дальнейшем центрами зарождения кластерной фазы.

На рис. 3 показано типичное изображение начальной стадии формирования нанокластерного покрытия с конденсированной фазой (рис. 3, а) и кластерной фазой (рис. 3, б).

Изучение кинетики и особенностей морфологии топокомполитов в зависимости от режимов и условий их формирования показали, что при снижении значений угла наклона ионного потока относительно поверхности образца  $\alpha \leq 20 \div 30^\circ$  механизм образования как кластерной (рис. 4, а), так и конденсированной фаз (рис. 4, б) меняется: строение поверхности приобретает волнообразный вид (рис. 4, а).

Происходящее «расслоение» нанокластерных агломератов оказывает влияние и на трансформацию строения конденсированной фазы покрытия, приводя к заметному текстурированию поверхностного слоя в направлении ионно-плазменного воздействия (см. рис. 4, б).

Сохранить строение и устойчивый рост кластерной фазы в присутствии текстурирования конденсированной фазы удаётся за счёт ионной имплантации на начальном этапе образования зародышей кластерных агломератов с использованием шаблона (рис. 5) и последующим увеличением угла фронта наращивания покрытия до значений  $\alpha \geq (40 \div 45^\circ)$ .

В этом случае достигается получение требуемого строения поверхности топокомполита с присутствием как кластерной в виде «выступа» (рис. 5, а), так и конденсированной фаз в виде «впадины» (рис. 5, б).

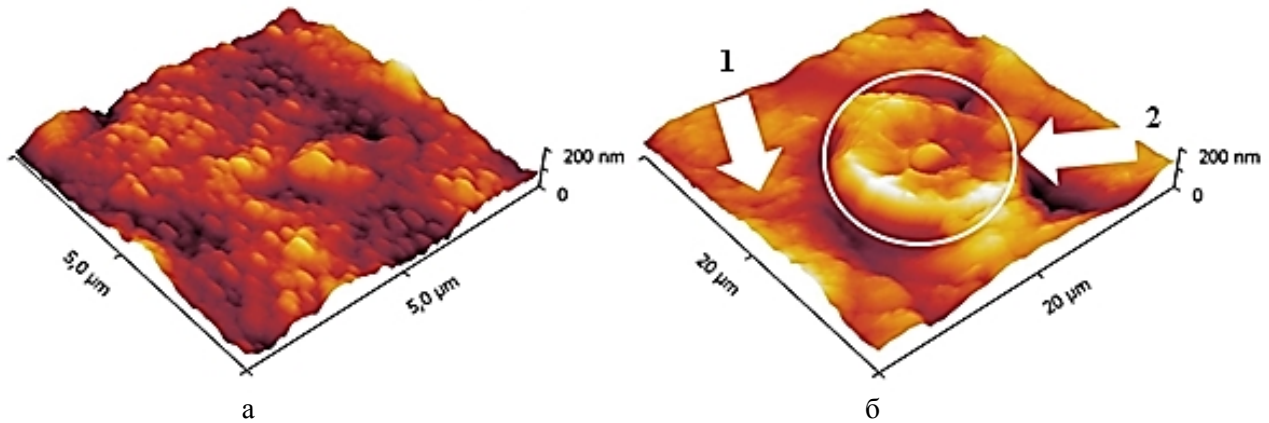


Рис. 3. Вид поверхности покрытия: а – с выраженной конденсированной фазой; б – с выраженной кластерной фазой; стрелками показаны: 1 – конденсированная фаза; 2 – кластерная фаза  
 Fig. 3. Type of the coating surface: а is with an apparent condensed phase; б is with an apparent cluster phase; arrowed lines show 1 is a condensed phase; 2 is a cluster phase

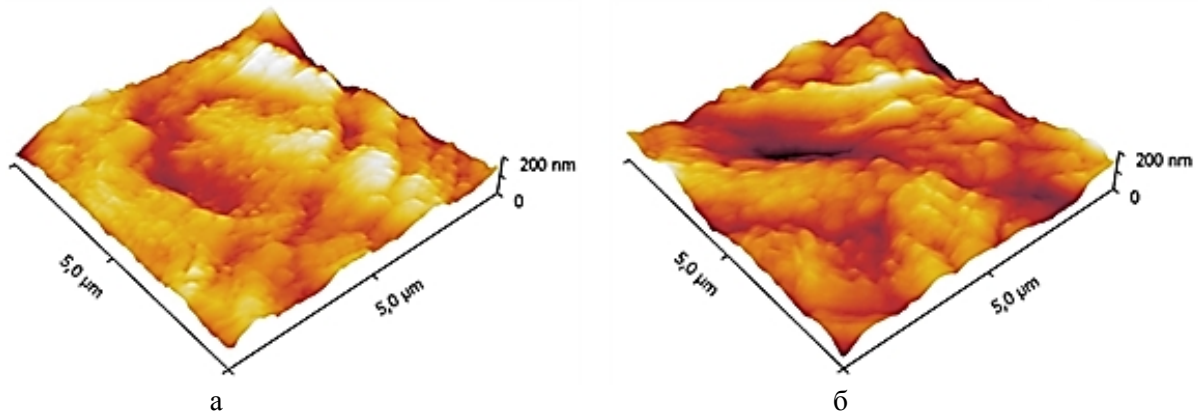


Рис. 4. Изображение трансформации морфологии поверхности топокомпозита в зависимости от изменения угла фронта наращивания покрытия: а – кластерная фаза; б – конденсированная фаза  
 Fig. 4. Changes in the morphology of the topocomposite surface depending on changes in the angle of the coating buildup: а is a cluster phase; б is a condensed phase

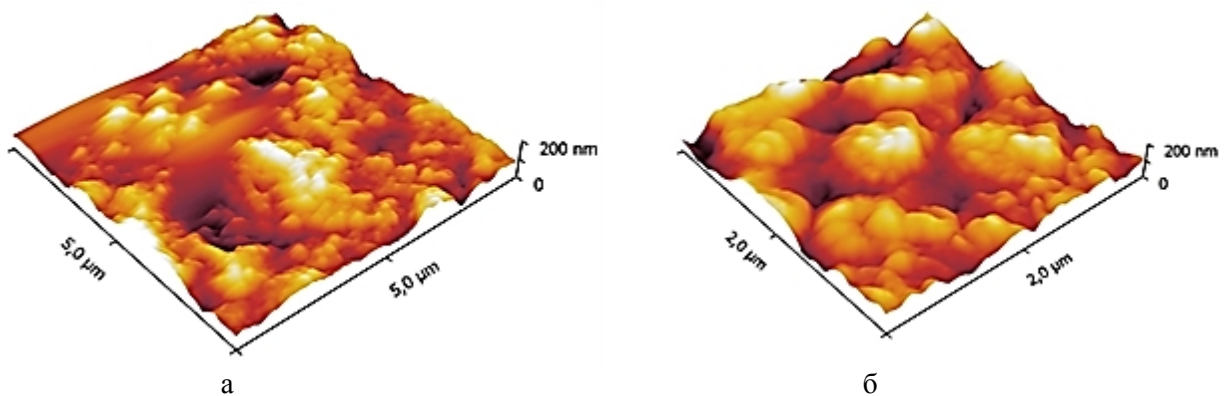


Рис. 5. Изображение эволюции строения поверхности наноструктурного топокомпозита, сформированного комбинированным ионно-плазменным и ионно-лучевым воздействием с использованием меняющегося и дискретного фронта наращивания покрытия: а – начальная стадия формирования кластерной фазы; б – сформированная нанокластерная морфология поверхности  
 Fig. 5. Evolution of the surface of the nanostructured topocomposite formed by combined ion-plasma and ion-beam treatment, using a discrete and varying front: а is an initial stage of forming the cluster phase; б is formed nanoclustered morphology of the surface

На **рис. 6** приведены РФЭС-спектры азота для покрытий на ВК-8 с различным временем формирования.

На **рис. 6, а** видно, что положение основного максимума N 1s линии для всех вариантов покрытий совпадает и составляет ~396 эВ. Это соответствует азоту, химически связанному с титаном (TiN). Высокоэнергетический максимум спектра N 1s на энергии связи ~397,8 эВ (**рис. 6, б**) соответствует азоту в составе оксинитридов титана ( $\text{TiN}_x\text{O}_{1-x}$ ). Соотношение интегральных площадей компонентов, соответствующих азоту в составе TiN и  $\text{TiN}_x\text{O}_{1-x}$ , присутствующих в покрытии, имеют близкие значения. Доля азота в TiN составляет ~80%, доля азота  $\text{TiN}_x\text{O}_{1-x}$  ~20% (см. **рис. 6, б**).

Детальный анализ линии O 1s кислорода с разложением на компоненты (**рис. 7**) подтверждает присутствие оксинитридов титана ( $\text{TiN}_x\text{O}_{1-x}$ ) в покрытиях. Кроме того, кислород в покрытиях присутствует в трех различных химических состояниях. Компонент спектра с максимумом на энергии связи ~530 эВ отвечает кислороду, входящему в состав оксида титана ( $\text{TiO}_2$ ). Компонент с максимумом на энергиях связи ~531,6 эВ соответствует кислороду в составе оксинитридов титана ( $\text{TiN}_x\text{O}_{1-x}$ ). Высокоэнергетический компонент спектра (энергия связи ~533 эВ) отвечает кислороду, химически связанному с углеродом в составе C-O и C=O. Наличие углерод-кислородных химических связей может быть обусловлено частичным окислением углерода.

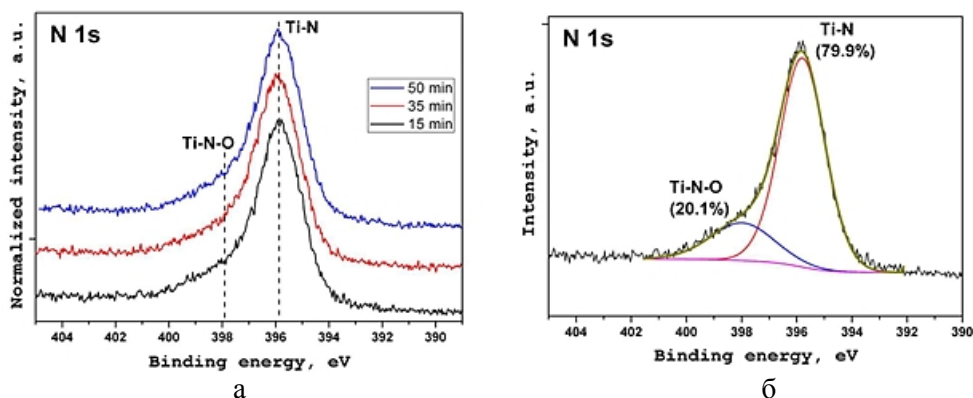


Рис. 6. РФЭС-спектры азота N 1s: а – для покрытий на ВК-8, сформированных при различном времени получения; б – спектр азота с разложением на компоненты для покрытия при времени формирования  $t=35$  мин

Fig. 6. XPS spectra of N 1s: а is for coatings on BK-8 formed in various periods of production; б is spectrum of nitrogen broken down in the components for coating at forming time  $t=35$  min

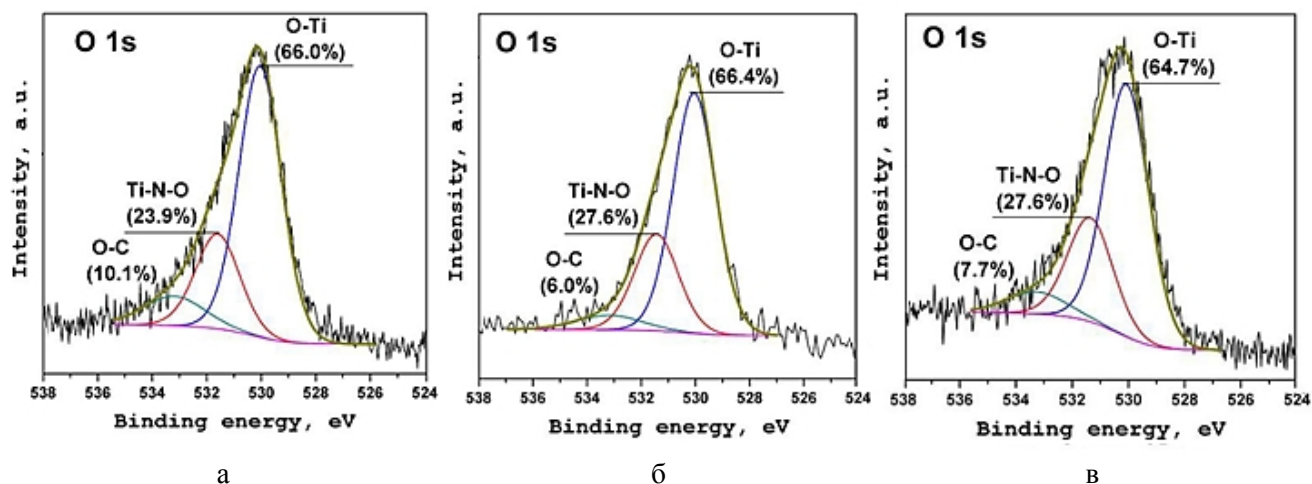


Рис. 7. РФЭС-спектры кислорода O 1s для покрытий, полученных при различном времени формирования: а – 15 мин; б – 35 мин; в – 50 мин

Fig. 7. XPS spectra of oxygen O 1s for coatings formed in various periods of production: а is 15 min; б is 35 min; в is 50 min



Как следует из результатов, приведённых на **рис. 7**, компоненты спектров кислорода для всех вариантов покрытий имеют близкое значение относительной подынтегральной площади. Наибольшее количество кислорода в составе оксида титана наблюдается для покрытия, сформированного при 15 минутах. Следовательно, на начальных стадиях формирования покрытий, т.е. в области границы покрытие – основа, при исследуемых условиях получения наноструктурного топокомпозита происходит образование энергоёмких оксинитридных фаз.

На **рис. 8** приведены типичные кинетические зависимости изнашивания НСТК на основе ВК-8 в условиях резания труднообрабатываемых титановых и хромоникелевых сплавов.

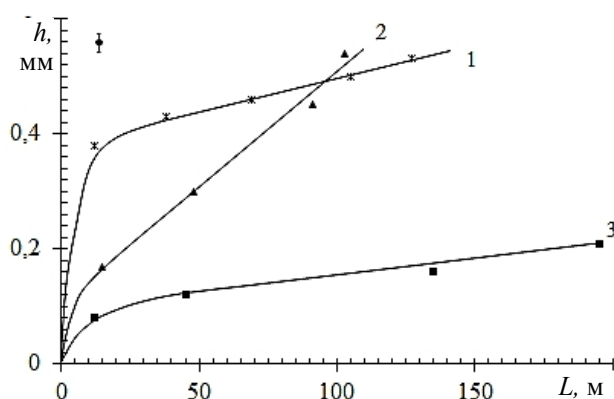


Рис. 8. Кинетические зависимости изнашивания: 1 – твёрдый сплав ВК 8; 2 – наноструктурный топокомпозит на металлокерамической основе (ВК-8); 3 – наноструктурный топокомпозит на металлокерамической основе (ВК-8) с кластерно-градиентной архитектурой;  $L$  – путь резания;  $h$  – фаска износа по задней поверхности резца (условия эксперимента: скорость резания  $V=30$  м/мин; подача  $S=0,15$  мм/об; глубина резания  $t=1,5$  мм)

Fig. 8. Kinetic curves of wear: 1 is tough alloy BK 8; 2 is a nanostructured ceramic-metal-based topocomposite (BK-8); 3 is a nanostructured ceramic-metal-based topocomposite (BK-8) with cluster-gradient architecture;  $L$  is cutting length;  $h$  is a flank wear land along the flank surface (experimental conditions: cutting speed  $V=30$  m/min; feed  $S=0.15$  mm/rev.; cutting depth  $t=1.5$  mm)

Согласно представленным результатам при резании никелевого сплава ХН62БКТЮ наблюдается снижение интенсивности процессов изнашивания наноструктурного топокомпозита как на начальном этапе, так и на стадии нормального износа. Можно утверждать, что повышение износостойкости материала достигается главным образом за счёт адаптивных явлений структурной приспособ-

ливаемости (формирования вторичных структур) в его приповерхностных слоях, развивающихся на этапе приработки, способствующих высокой сопротивляемости циклическим нагрузкам и интенсивным окислительным процессам, характерным для данных условий резания.

### Заключение

Полученные результаты показывают, что разработка наноструктурных топокомпозитов с кластерно-градиентной архитектурой требует установления взаимосвязи между физическими процессами при формировании их поверхностных структур и технологическими режимами ионно-плазменного и ионно-лучевого модифицирования. Для получения данного типа наноструктурных топокомпозитов была проведена модернизация ионно-плазменной установки, что значительно расширило технологические возможности их получения с использованием дискретного и изменяющегося фронта наращивания покрытия.

Исследования процессов формирования кластерной и конденсированной фаз позволили изучить особенности их совместной эволюции, проявляющейся в виде «расслоения» кластерной фазы и текстурирования конденсированной фазы покрытия вследствие интенсификации массопереноса вдоль поверхности формируемого покрытия под действием ионно-плазменных потоков.

Установлено, что управление процессами формирования требуемой морфологии как кластерной, так и конденсированной фаз возможно при определённом сочетании и определённой последовательности технологических операций активации, ионного ассистирования и напыления покрытия. В частности, для обеспечения стабильного роста кластерной фазы необходимо осуществить предварительную активацию поверхности путём селективной ионной обработки для получения развитой удельной поверхности (нанорельефа) с одновременной обработкой импульсным ионным пучком с целью обеспечения высокой адгезии покрытия с основой. Кроме того, наличие оксинитридов титана ( $TiN_xO_{1-x}$ ) в области интерфейса позволяет предположить, что они являются центрами кристаллизации и устойчивого роста кластерной фазы. Присутствие оксинитридов вносит свой вклад в процессы структурной приспособляемости наноструктурных топокомпозитов в условиях резания труднообрабатываемых никелевых сплавов, что подтверждается проведёнными экспериментами. Вместе с тем на процессы диссипации энергии при трибовзаимодействии оказывает своё влияние и нанокластерная морфология поверхности топокомпозитов [15], что подтверждает акту-



альность дальнейших исследований в области совершенствования данного типа материалов.

### Список литературы

1. Grigoriev S.N., Vereschaka A.A., Vereschaka, A.S., Kutin A.A. Cutting tools made of layered composite ceramics with nano-scale multilayered coatings. *Procedia CIRP*. 2012. Vol. 1. P. 318–323.
2. Vereshchaka A.S., Karpuschewski B., Dubner L. Development of the method of obtaining nanostructured functional coatings. *Proceedings of the Intern. Scient. Conf. "Production. Technology"*. 2008. Vol.1. P. 62.
3. Smith I.J., Muenz W.D., Donohue L.A., Petrov I., Greene J.E. Improved Ti1-xAlxN PVD coatings for dry high speed cutting operations. *Surf Eng.* 1998. Vol. 14 (1). P. 37–41.
4. Blinkov I.V., Volkhonskii A.O., Anikin V.N., Petrzhik M.I., Derevtsova D.E. 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. № 3. P. 285–291.
5. Volkhonskii A.O., Blinkov I.V., Elyutin A.V., Podstyzhonok O.B. High-performance wear-resistant ion-plasma coatings based on five-component nitrides for a hard-alloy cutting tool operating under constant loads // *Metallurgist*. 2010. Vol. 54. P. 374–377.
6. 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. P. 57–63.
7. 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.
8. Разработка и получение наноструктурных топокомполитов / Гринберг П.Б., Коротаев Д.Н., Полещенко К.Н., Суриков В.И. // *Вестник СибАДИ*. 2015. № 3(43). С.39–45.
9. Метод получения наноструктурированных топокомполитов для повышения несущей способности конструктивных элементов энергооборудования / Гринберг П.Б., Полещенко К.Н., Горюнов В.Н., Тарасов Е.Е. // *Вестник Омского университета*. 2012. № 2. С. 253–258.
10. Полещенко К.Н., Коротаев Д.Н., Тарасов Е.Е. Структурно-морфологические особенности наноструктурных топокомполитных покрытий триботехнического назначения // *Вестник СибАДИ*. 2016. № 4(50). С.126–132.
11. Korotaev D.N., Tarasov E.E., Poleschenko K.N., Eremin E.N., Ivanova E.V. Formation of wear resistant nanostructural topocomposite coatings on metal materials by ionic-plasma processing // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1050(1). P. 012037.
12. Grinberg P.B., Poleschenko K.N., Korotaev D.N., Orlov P.V., Vershinin G.A., Tarasov E.E., Ivanova E.V. Receiving nanostructural topocomposite coatings in terms of the cascade cross effect // *Journal of Physics: Conf. Series*. 2019. Vol. 1210. P. 012054.
13. Влияние кластерно-градиентной архитектуры наноструктурных топокомполитов на особенности трибовзаимодействия с гетерофазным материалом / Коротаев Д.Н., Полещенко К.Н., Еремин Е.Н., Тарасов Е.Е. // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2020. Т. 16, № 3 (183). С. 130–135.
14. Моисеенко Д.Д., Максимов П.О. Эффект «шахматной доски» и формирование спиральных мезоструктур на интерфейсе «поверхностный слой – подложка»: моделирование на основе стохастического подхода // *Физическая мезомеханика*. 2005. Т.8, № 6. С.89–96.
15. Vereschaka A.S., Vereschaka A.A., Kirillov A.K. Ecologically friendly dry machining by cutting tool from layered composition ceramic with nano-scale multilayered coatings. *Key Eng. Materials*. 2012. Vol. 496. P. 67–76.
16. Veprek S., Argon A.S. Mechanical properties of super hard nanocomposites. *Surf. Coat. Technol.* 2001. P. 175–182.
17. Панин В.Е., Панин А.В. Эффект поверхностного слоя в деформируемом твёрдом теле // *Физическая мезомеханика*. 2005. Т.8, № 5. С. 7–15.
18. Эффект «шахматной доски» в распределении напряжений и деформаций на интерфейсах в нагруженном теле: экспериментальная верификация и механизмы мезоскопического каналирования / Панин В.Е., Панин А.В., Елсукова Т.Ф., Кузина О.В. // *Физическая мезомеханика*. 2005 Т.8, № 6. С.97–105.
19. Иванова В.С., Буше Н.А., Гершман И.С. Структурная приспособляемость при трении как процесс самоорганизации // *Трение и износ*. 1997. Т. 18, № 1. С. 74–79.
20. Ким В.А. Самоорганизация в процессах упрочнения, трения и изнашивания режущего инструмента. Владивосток: Дальнаука, 2001. 203 с.
21. Бершадский Л.И. Структурная термодинамика трибосистем. Киев: Знание, 1990. 253 с.
22. Мигранов М.Ш., Шустер Л.Ш. Интенсификация процесса металлообработки на основе использования эффекта самоорганизации при трении. М.: Машиностроение, 2005. 202 с.
23. Эффект дальнего действия при формировании наноструктурных топокомполитов под воздействием комбинированных ионно-плазменных потоков / Коротаев Д.Н., Полещенко К.Н., Еремин Е.Н., Орлов П.В., Вершинин Г.А., Тарасов Е.Е. // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2020. Т. 16, № 4 (184). С. 187–192.

### References

1. Grigoriev S.N., Vereschaka A.A., Vereschaka, A.S., Kutin A.A. Cutting tools made of layered composite ceramics with nano-scale multilayered coatings. *Procedia CIRP*, no. 1, pp. 318–323 (2012).
2. Vereshchaka A.S., Karpuschewski B., Dubner L. Development of the method of obtaining nanostructured functional coatings. *Proceedings of the Intern. Scient. Conf. "Production. Technology"*, vol. 1, 62 p. (2008).
3. Smith I.J., Muenz W.D., Donohue L.A., Petrov I., Greene J.E. Improved Ti1-xAlxN PVD coatings for dry high speed cutting operations. *Surf Eng.* vol. 14 (1), pp. 37–41 (1998).
4. Blinkov I.V., Volkhonskii A.O., Anikin V.N., Petrzhik M.I., Derevtsova D.E. 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*, vol. 2, no. 3, pp. 285–291 (2011).
5. Volkhonskii A.O., Blinkov I.V., Elyutin A.V., Podstyzhonok O.B. High-performance wear-resistant ion-plasma coatings based on five-component nitrides for a hard-alloy cutting tool operating under constant loads. *Metallurgist*, vol. 54, pp. 374–377 (2010).
  6. Blinkov I.V., Volkhonsky A.O., Podstyzhonok O.B. Structure and properties of multilayer coatings deposited with PVD-arc technology. *Surface engineering*, no. 2, pp. 57–63 (2011).
  7. Upadhyay R., Brossard N., Chen C.H. Mechanisms underlying astringency: introduction to an oral tribology approach. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 49, p. 104003 (2016).
  8. Grinberg P.B., Korotaev D.N., Poleschenko K.N., Surikov V.I. Development and production of nanostructured topocomposites. *Vestnik SibADI* [The Russian Automobile and Highway Industry Journal], 2015, no. 3(43), pp. 39–45. (In Russ.)
  9. Grinberg P.B., Poleschenko K.N., Goryunov V.N., Tarasov E.E. The method of producing nanostructured topocomposites to increase carrying capacity of structural elements of power equipment. *Vestnik Omskogo universiteta* [Herald of Omsk University], 2012, no. 2, pp. 253–258. (In Russ.)
  10. Poleschenko K.N., Korotaev D.N., Tarasov E.E. Structural and morphological features of nanostructured topocomposite coatings of a tribotechnical application. *Vestnik SibADI* [The Russian Automobile and Highway Industry Journal], 2016, no. 4(50), pp. 126–132. (In Russ.)
  11. Korotaev D.N., Tarasov E.E., Poleschenko K.N., Eremin E.N., Ivanova E.V. Formation of wear resistant nanostructural topocomposite coatings on metal materials by ionic-plasma processing. *Journal of Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1050(1), pp. 012037 (2018).
  12. Grinberg P.B., Poleschenko K.N., Korotaev D. N., Orlov P.V., Vershinin G.A., Tarasov E.E., Ivanova E.V. Receiving nanostructural topocomposite coatings in terms of the cascade cross effect. *Journal of Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1210, pp. 012054 (2019).
  13. Korotaev D.N., Poleschenko K.N., Eremin E.N., Tarasov E.E. The effect of cluster-gradient architecture of nanostructured topocomposites on features of tribological relations with a heterophase material. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening Technologies and Coatings], 2020, vol. 16, no. 3 (183), pp. 130–135. (In Russ.)
  14. Moiseenko D.D., Maksimov P.O. The effect of a “chessboard” and forming helical mesostructures at the interface “surface layer – substrate”: simulation by applying a stochastic approach. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics], 2005, vol. 8, no. 6, pp. 89–96. (In Russ.)
  15. Vereschaka A.S., Vereschaka A.A., Kirillov A.K. Ecologically friendly dry machining by cutting tool from layered composition ceramic with nano-scale multilayered coatings. *Key Eng. Materials*, vol. 496, pp. 67–76 (2012).
  16. Veprek S., Argon A.S. Mechanical properties of super hard nanocomposites. *Surf. Coat. Technol.*, pp. 175–182 (2001).
  17. Panin V.E., Panin A.V. The effect of a surface layer in deformed solids. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics], 2005, vol. 8, no. 5, pp. 7–15. (In Russ.)
  18. Panin V.E., Panin A.V., Elsukova T.F., Kuzina O.V. The effect of a “chessboard” in distributing stresses and strains at interfaces in loaded bodies: experimental verification and mechanisms of mesoscopic channeling. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics], 2005, vol. 8, no. 6, pp. 97–105. (In Russ.)
  19. Ivanova V.S., Bushe N.A., Gershman I.S. Structural adaptability to friction as a process of self-organization. *Trenie i iznos* [Friction and Wear], 1997, vol. 18, no. 1, pp. 74–79. (In Russ.)
  20. Kim V.A. *Samoorganizatsiya v protsessakh uprochneniya, treniya i iznashivaniya rezhushchego instrumenta* [Self-organization in processes of hardening, friction and wear of cutting tools]. Vladivostok: Dalnauka, 2001, 203 p. (In Russ.)
  21. Bershadsky L.I. *Strukturnaya termodinamika tribosistem* [Structural thermodynamics of tribological systems]. Kiev: Znanie, 1990, 253 p. (In Russ.)
  22. Migranov M.Sh., Shuster L.Sh. *Intensifikatsiya protsessa metalloobrabotki na osnove ispolzovaniya efekta samoorganizatsii pri trenii* [Intensifying the process of metal treatment by using the effect of self-organization during friction]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2005, 202 p. (In Russ.)
  23. Korotaev D.N., Poleschenko K.N., Eremin E.N., Orlov P.V., Vershinin G.A., Tarasov E.E. The effect of a long-range action, when forming nanostructured topocomposites by applying combined ion-plasma flows. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening Technologies and Coatings], 2020, vol. 16, no. 4 (184), pp. 187–192. (In Russ.)

Поступила 29.03.2021; принята к публикации 05.04.2021; опубликована 28.06.2021  
Submitted 29/03/2021; revised 05/04/2021; published 28/06/2021

**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

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

**Ерёмин Евгений Николаевич** – доктор технических наук, профессор, профессор,  
Омский государственный технический университет, Омск, Россия.  
Email: weld\_techn@mail.ru. ORCID 0000-0001-7357-8194

**Несов Сергей Николаевич** – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель,  
Омский государственный технический университет, Омск, Россия.  
Email: nesov55@mail.ru. ORCID 0000-0003-0421-3356

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

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

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

**Иванова Елена Владимировна** – кандидат технических наук, доцент,  
Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, Москва, Россия.  
Email: elenaivanova-01@mail.ru. ORCID 0000-0003-1107-0533

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

**Иванов Александр Леонидович** – кандидат технических наук, доцент,  
Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), Омск, Россия.  
Email: alsib07@yandex.ru

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

**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 N. Eremin** – DrSc (Eng.), Professor,  
Omsk State Technical University, Omsk, Russia.  
Email: weld\_techn@mail.ru. ORCID 0000-0001-7357-8194

**Sergey N. Nesov** – PhD (Physics and Mathematics), Senior Lecturer,  
Omsk State Technical University, Omsk, Russia.  
Email: nesov55@mail.ru. ORCID 0000-0003-0421-3356

**Evgeniy E. Tarasov** – process engineer,  
Federal Research and Production Centre Progress, Omsk, Russia.  
Email: tarasov\_ee@mail.ru

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

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

**Elena V. Ivanova** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia.  
Email: elenaivanova-01@mail.ru. ORCID 0000-0003-1107-0533

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

**Alexander L. Ivanov** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia.  
Email: alsib07@yandex.ru