

ние измельчаемых материалов. Изменение величины эксцентриситета в диапазоне от 1 до 3 мм приводит к повышению эффективности измельчения материалов за счет увеличения объемно-сдвигового деформирования их частиц [5].

**Заключение.** Проведенные экспериментальные исследования по изучению процессов измельчения сильвинита в вибровалковом измельчителе подтвердили теоретически полученные результаты и свидетельствуют о целесообразности реализации раздавливающе-сдвигового и вибрационного деформирования сильвинита.

Согласно уравнениям регрессии, с увеличением частоты вращения эксцентрикового вала, производительность процесса измельчения возрастает на 15...25 %, при этом энергоемкость процесса снижается до 12 %.

Величина эксцентриситета увеличивает производительность процесса измельчения 10...18 %, при этом энергоемкость процесса возрастает на 5...10 %.

Наиболее оптимально процесс измельчения происходит при величине эксцентриситета равном  $e = (2...3) \cdot 10^{-3}$  м, на что указывает минимальное значение удельной энергозатраты, выраженное экстремумом функции и равное  $q = 3,1$  кВт · ч / т.

Построенные по полученным уравнениям регрессии графические зависимости адекватно отражают процессы измельчения в вибровалковом измельчителе и подтверждают проведенный ранее теоретический анализ и поисковые эксперименты.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гончаревич, И. Ф. Вибротехника в горном производстве / И. Ф. Гончаревич. – М. : Недра, 1992. – 319 с.
2. Богданов, В. С. Процессы в производстве строительных материалов / В. С. Богданов, А. С. Ильин, И. А. Семикопенко. – Белгород : Вевелита, 2007. – 512 с.
3. Гутьяр, Е. М. К объемной теории дробления / Е. М. Гутьяр // Изв. Моск. с.-х. акад. им. Тимирязева. – 1961. – Вып. 4. – С. 163–166.
4. Kraus, W. Grinding technique / W. Kraus // Chemie – Ingénieurs – Technique, – 1980. – Vol. 36, № 10. – P. 1053–1060.
5. Интенсификация технологических процессов в аппаратах адаптивного действия : коллектив. монография / Л. А. Сиваченко [и др.] ; под науч. ред. Л. А. Сиваченко ; М-во образования Респ. Беларусь, Баранович. гос. ун-т. – Барановичи : БарГУ, 2020. – 359 с.

УДК 621.793:66.088

#### КРИОГЕННАЯ МОДИФИКАЦИЯ ВАКУУМНЫХ ПОКРЫТИЙ

*Хвисевич В. М.<sup>1</sup>, Чекал Н. М.<sup>2</sup>, Веремейчик А. И.<sup>1</sup>, Овчинников Е. В.<sup>3</sup>,  
Акула А. П.<sup>2</sup>*

- 1) Брестский государственный технический университет, г. Брест, Республика Беларусь
- 2) Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь
- 3) Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, г. Гродно, Республика Беларусь

Нанесение покрытий – один из наиболее широко используемых способов изменения морфологии поверхности, износостойкости, адгезии и усталостной

прочности материала подложки без существенного изменения геометрических размеров материала. Классическими методами повышения триботехнических характеристик являются следующие: термическое напыление; технологии, основанные на физическом получении вакуумных покрытий; получение покрытий при воздействии потока ионов, радиочастотное магнетронное распыление и электроосаждение, формирование покрытий из газовой среды. Современные методы нанесения материалов на поверхность субстрата открывают новые возможности, а также интенсифицируют исследования в области создания новых химических соединений для формирования покрытий, имеющих улучшенные характеристики такие, как электрические, механические, термические, антифрикционные.

Основными методами нанесения износостойких покрытий в вакууме являются: катодное распыление, термическое напыление и ионное осаждение [1–7]. Высокую износостойкость имеют покрытия TiC, TiN, отличающиеся высокой твердостью и относительно невысокими коэффициентами трения. Качество нанесения покрытия зависит от давления, расхода газа, вида и состава газовой среды, температуры в камере и других факторов. В ряде работ показано, что структура, свойства покрытий нитрида и карбонитрида титана, циркония и параметры процесса их осаждения связаны сложным образом [1, 3, 4].

Покрытия TiC и TiN имеют высокую износостойкость при адгезионном и абразивном изнашивании. В то же время в условиях эрозионного изнашивания эти покрытия приобретают хрупкость. Покрытие TiN применяют в парах трения, работающих в агрессивных средах, в вакууме, в условиях низких и высоких температур, в узлах возвратно-поступательного движения в вакууме и в среде инертных газов. Нанесение TiN обеспечивает увеличение износостойкости на один-два порядка; износ контртела увеличивается при этом не более чем в 2–3 раза [1].

Изнашивание азотированных образцов меньше, чем необработанных и имплантированных ионами азота, объясняется различием химического состава и микрорельефом, способным создавать резервуары для смазочного масла [1, 4].

В последнее время все большее применение находят комбинированные покрытия, так, например, в работе [1, 5] было исследовано покрытие TiN и мультислойное полосчатое покрытие  $(\text{Cu}+\text{TiN})_x$ . Авторами работ [1, 5] на основании проведенных исследований было предложено в трибоузлах, работающих без смазки, покрытие нитрид титана осаждают на обе детали пары трения. Процесс изнашивания в этом случае носит абразивно-усталостный характер. При трении поверхности образцов с покрытием по контртелу из закаленной стали имеет место интенсивное окислительное изнашивание контртела, сопровождающееся значительными колебаниями величины момента и коэффициента трения, поэтому оптимальными для этого класса пар трения являются мультислойные полосчатые покрытия  $(\text{Cu}+\text{TiN})_x$ . Процесс изнашивания упрочненных деталей определяется видом и толщиной покрытия, жесткостью материала подложки и ее исходной шероховатостью [1].

На структуру формируемых вакуумных покрытий существенное влияние оказывает предистория субстрата, на котором формируется вакуумное покрытие. Связи с этим применяют различные методы активации подложек перед формированием различного типа покрытий. Одним из перспективных направлений является обработка субстрата в криогенной жидкости перед формированием покрытий. Обычно вакуумные покрытия формируются на металлических (в большинстве случаев стальных) изделиях, что позволяет существенно увеличить

эксплуатационный ресурс. Обработка металлических подложек в криогенной жидкости может приводить к существенным изменениям в структуре и физико-механических характеристиках.

Согласно современным представлениям основные физико-механические характеристики материалов, в том числе и металлов, могут быть существенно изменены за счет создания нанокристаллического состояния [8–10]. Поскольку при криогенной обработке нанокристаллические структуры могут возникать естественным путем, одним из перспективных способов и энергосберегающих способов поверхностного наноструктурирования сплавов на основе железа является обработка при температурах, близких к абсолютному нулю. Криогенная обработка приводит к превращению остаточного аустенита в высокодисперсный (наноструктурированный) мартенсит деформации, а также выражается в положительном влиянии аустенита на вязкость разрушения. Процентное содержание углерода в мартенсите деформации соответствует концентрации углерода в высокоуглеродистом аустените. Таким образом, получаемый мартенсит является неотпущенным мартенситом, что обуславливает высокую твердость и износостойкость [8].

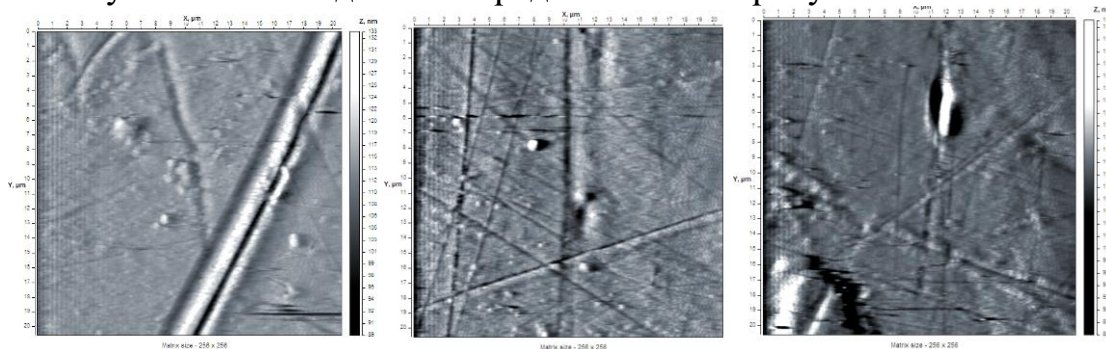
Образование наноструктур в металлической подложке может приводить к образованию зарядовой мозаики на поверхности металла, что, в свою очередь, будет оказывать влияние на кинетику формирования вакуумных покрытий [8–10]. Проведено исследование влияния предварительной обработки в криогенной жидкости на физико-механические характеристики металлической подложки, изготовленной из стали 08кп, а также вакуумных покрытий, сформированных на активированном субстрате [8–10].

В ходе проведенных исследований определяли микротвердость исходных субстратов, в том числе после обработки в жидком азоте при различных временах выдержки (таблица 1) [8–10].

Таблица 1 – Значения микротвердости стали 08 кп, подвергнутой воздействию криогенных температур

Вид обработки	Исходный материал	Выдержка в течение 60 мин в жидком азоте	Выдержка в течение 24 ч в жидком азоте
Н, ГПа	0,4	0,45	0,47

Также были проведены исследования по изучению изменений в структуре поверхностных слоев углеродистой стали типа 08кп при воздействии криогенных температур. Исследования проводились методом атомно-силовой микроскопии. Результаты исследований представлены на рисунке 1.



а

б

в

20.6 × 20.6 μm  
A = 282.3 nm  
Ra = 19.8 Rq = 29.0

20.6 × 20.6 μm  
A = 177.7 nm  
Ra = 16.4 Rq = 20.1

20.6 × 20.6 μm  
A = 101.1 nm  
Ra = 12.0 Rq = 15.5



д

е

ж

*а – в – морфология, д – ж – фазовый анализ, а, д – исходная поверхность, б, е – обработка в жидком азоте в течение 3 ч, в, ж – обработка в жидком азоте в течение 24 ч. Площадь сканирования 20x20 мкм*

*Рисунок 1 – Атомно-силовое изображение поверхностных слоев углеродистой стали 08кп после криогенной обработки*

Исходя из полученных данных видно, что происходит уменьшение параметров шероховатости при криогенной обработке покрытий при временах экспозиции 180 мин. Дальнейшая выдержка исследуемых образцов приводит к возрастанию параметров шероховатости. Это может свидетельствовать о структурных перестройках при проведении низкотемпературной обработки.

Определены значения удельной поверхностной энергии стали 08кп до и после проведения криогенной обработки (таблица 2).

*Таблица 2 – Значения удельной поверхностной энергии стали 08 кп, после проведения криогенной обработки*

Параметр	Образец		
	исходный	подвергнутый воздействию криогенных температур	
Время выдержки в криогенной жидкости	–	60 мин	1440 мин
Угол смачивания вазелинового масла, град	22°30'	19,20	14,70
Угол смачивания водой, град	62°50'	34,50	75,10
Работа адгезии вазелинового масла, мДж	57,72	58,33	59,02
Работа адгезии воды, мДж	104,74	131,26	90,46
Дисперсионный компонент поверхностной энергии, мДж/м <sup>2</sup>	10,58	44,24	1,26
Полярный компонент поверхностной энергии, мДж/м <sup>2</sup>	89,52	183,37	49,96
Поверхностная энергия, мДж/м <sup>2</sup>	100,10	227,61	51,23

Согласно данным таблицы 5 обработка в криогенной жидкости приводит к активации поверхностных слоев субстрата, что в свою очередь сказывается на прочностных характеристиках вакуумных покрытий, формируемых на стальных подложках (таблицы 3–5).

*Таблица 3 – Значения микротвердости покрытий нитрида титана, сформированных на активированных стальных субстратах стали 08 кп, подвергнутой воздействию криогенных температур*

Вид обработки	Исходный материал+TiN	Выдержка субстрата в течение 60 мин в жидком азоте+TiN	Выдержка субстрата в течение 24 ч в жидком азоте+TiN
Н, ГПа	3,1	3,9	4,7

Таблица 4 – Значения микротвердости покрытий нитрида титана, сформированных на активированных криогенной средой стальных субстратах стали 08 кп с последующей обработкой при криогенных температурах

Вид обработки	Исходный материал+TiN+ обработка в жидком азоте в течение 60 мин	Выдержка субстрата в течение 60 мин в жидком азоте+TiN+ обработка в жидком азоте 60 мин	Выдержка субстрата в течение 60 мин в жидком азоте+TiN+ обработка в жидком азоте в течение 24 ч
Н, ГПа	3,8	4,5	4,6

Таблица 5 – Значения микротвердости покрытий нитрида титана, сформированных на активированных криогенной средой стальных субстратах стали 08 кп с последующей обработкой при криогенных температурах

Вид обработки	Исходный материал+TiN+ обработка в жидком азоте в течение 24 ч	Выдержка субстрата в течение 24 ч в жидком азоте+TiN+ обработка в жидком азоте 60 мин	Выдержка субстрата в течение 24 ч в жидком азоте+TiN+ обработка в жидком азоте в течение 24 ч
Н, ГПа	3,9	5,2	5,4

Таким образом, предварительная обработка стальных подложек в криогенной жидкости приводит к возрастанию прочностных характеристик вакуумных покрытий. Данный эффект обусловлен скорее всего изменением зарядовой мозаики на поверхности металлического субстрата, что оказывает существенно влияние на размер образуемых кристаллитов в формируемом вакуумном покрытии. Дополнительная обработка в жидком азоте покрытий, сформированных на активированных стальных подложках, приводит к дальнейшему возрастанию значений прочностных характеристик.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Щерба, В. Я. Особенности формирования тонкопленочных вакуумных покрытий из композиционных материалов на поверхностях трения машиностроительных изделий / В. Я. Щерба // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. – 2013. – № 3. – С. 102–106.
- 2 Верещака, А. С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями / А. С. Верещака, И. П. Третьяков. – М., 1986. – 113 с.
- 3 Щадричев, Е. В. Изучение износостойкости инструментальных материалов с ионно-плазменными покрытиями нитрида титана / Е. В. Щадричев // Трение и износ. – 1994. – Т. 15, № 4. – С. 660–666.
- 4 Щадричев, Е. В. Изучение износостойкости инструментальных материалов с ионно-плазменными покрытиями нитрида титана / Е. В. Щадричев // Трение и износ. – 1994. – Т. 15, № 4. – С. 660–666.
- 5 Мрочек Ж.А. Триботехнические характеристики вакуумно-плазменных покрытий / Ж. А. Мрочек, С. А. Иващенко, И. С. Фролов // Трение и износ. – 2001. – Т. 22, № 3. – С. 305–310.
- 6 Попов, А. Н. Повышение износостойкости поверхностей трения путем нанесения многослойных покрытий / А. Н. Попов [и др.] // Трение и износ. – 2001. – Т. 22, № 3. – С. 317–321.
- 7 Бецофен, С. Я. Структура и свойства ионно-плазменных покрытий / С. Я. Бецофен [и др.] // Изв. АН СССР. Металлы. – 1990. – № 3. – С. 20–26.
- 8 Овчинников, Е. В. Криогенная технология повышения прочностных характеристик сталей пониженной прокаливаемости / Е. В. Овчинников [и др.] // Веснік ГрДУ, Сер. 6. – 2012. – № 3 (137). – С. 49–58.
- 9 Приходько, И. Ю. Актуальные области использования криогенных технологий в прокатном производстве / И. Ю. Приходько, П. В. Крот // Металлургические процессы и оборудование. – 2009. – № 1. – С. 10–16.
- 10 Овчинников, Е. В. СВЧ-модифицирование алмазоподобных покрытий / Е. В. Овчинников, Е. И. Эйсымонт, Н. М. Чекан // Горная механика и машиностроение. – 2011. – № 3. – С. 84–93.