

Рис. 3. Выделенная запись колебания ИМР на одном зубе

#### Заключение

1. Результаты проведенных исследований подтвердили недостаточность показателей поэлементной точности по ГОСТ 1643-81 для установления зависимости уровня шума от степени точности изготовления зубчатых колес.
2. Установлена зависимость общего уровня шума по шкале А от суммарного колебания ИМР на одном зубе  $\Sigma f_r''$  для зубчатых колес в пределах 7–9 степеней точности, изготовленных по технологическим процессам с зубошлифованием.
3. Предложено дальнейшее направления исследований для установления связей между параметрами спектра шума зубчатых передач и показателями точности зубчатых колес по спектральному анализу выделенного колебания измерительного межосевого расстояния на одном зубе.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Funktionslehren / Gleason. – 6 с.
2. Zweiflanken-Wälzprüfgeräte Klingelberg ZW 301 und ZW 401 / Klingelberg. – 1 с.
3. Double flank gear roll inspection machines / Frenco GmbH. – 20 с.
4. Zweiflankenwälzprüfgeräte / Frenco GmbH. – 8 с.
5. Die neue Software von FRENCO Frenco Gear Inspector 1.0 / Frenco GmbH. – 8 с.
6. Антонюк, В.Е. Двухпрофильный контроль зубчатых колес / В.Е.Антонюк, В.Н.Русецкий, В.Н.Лещев // Металлообработка. Оборудование и инструмент. Харьков. – 2010. – №2 (123). – С. 72–75.
7. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски: ГОСТ 1643-81. – М.: Издательство стандартов. – 1989. – 68 с.
8. Разработка комплексной системной оценки качества изготовления и технического состояния зубчатых приводов, методов улучшения их виброакустических характеристик и повышения надежности: отчет о НИР (закл.) / Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси; рук. Н.Н. Ишин. – Минск, 2010. – 72 с. – № ГР 20065571.
9. Reiter, E. Practical Considerations for the Use of Double-Flank Testing for the Manufacturing Control of Gearing – Part I / E. Reiter, F. Eberle // Gear Technology. January/February. – 2014. – S. 44–51.
10. Reiter, E. Practical Considerations for the Use of Double-Flank Testing for the Manufacturing Control of Gearing – Part I / E. Reiter, F. Eberle // Gear Technology. March/April – 2014. – S. 60–69.

Материал поступил в редакцию 17.11.15

#### ANTONJUK V.E., SKOROKHODOV A.S., ALEKSANDROVA V.S., RUSETSKI V.N. Interrelation of parametres of measuring interaxal distance with indicators of noise of cylindrical tooth gearings

Results of research of interrelation of indicators of noise with parametres of measuring interaxal distance of tooth gearings are stated at their two-profile control.

УДК 621.891.2

Гуца А.А., Дудан А.В., Жорник В.И.

### ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА УЗЛОВ ТРЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАНИЕМ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА НАНОРАЗМЕРНЫМИ АЛМАЗАМИ

**Введение.** Ресурс узлов трения машин в значительной степени определяется работоспособностью используемых смазочных материалов. Современное развитие техники связано с повышением скоростей и нагрузок в узлах трения, что требует разработки новых смазочных материалов, обладающих повышенной нагрузочной способностью и обеспечивающих более низкую интенсивность изнашивания.

В последнее время получают все большее распространение попытки направленного улучшения свойств пластичных смазок введением в их состав различных добавок. Использование добавок в смазках, и, прежде всего, совместное введение присадок и наполнителей, позволяет наиболее гибко регулировать структуру смазок. Все большее научное и практическое значение приобретают работы по использованию в качестве твердых добавок различного рода наноразмерных компонентов. Их использование дает результаты нового качественного уровня по сравнению с применяемыми ранее добавками.

В качестве наноразмерных частиц, оказывающих модифицирующее действие на смазочные материалы, используют ультрадисперсные металлы, керамики, природные силикаты, графит, фуллерены и фуллереноподобные структуры, углеродосодержащие продукты детонационного синтеза – ультрадисперсные алмазы (УДА) и ультрадисперсную алмазографитовую шихту (УДАГ).

**Применение УДА в качестве модификатора смазочных ма-**

**териалов** обусловлено рядом факторов: наноалмазы структурируют масляную пленку, увеличивают ее динамическую прочность, действуют на кристаллическую решетку поверхности металла, упрочняя ее, формируют новые поверхности трения, уменьшая граничное трение и износ (особенно при больших нагрузках).

Эти качества УДА реализуются многими разработчиками смазочных материалов с целью повышения антифрикционных и противоизносных свойств смазочных материалов, расширения диапазона их рабочих температур и нагрузок.

Используют как синтетический, так и природный технический алмазный порошок. Однако, следует отметить, что использование в качестве добавки природного технического алмазного порошка приводит к необходимости тщательного отбора и контроля однородности применяемого природного материала как по размерам частиц, так и по их составу.

Известен смазочный материал, содержащий базовое масло с присадкой в виде микропорошка природных алмазов, отличающийся тем, что в качестве присадки применен природный алмазный микропорошок в концентрации 1–10 мас.%, остальное – базовое масло [1]. Достижимый эффект заключается в повышении эксплуатационных свойств предлагаемого смазочного материала, а именно его противозадирных показателей. При этом наблюдается значительное ухудшение остальных эксплуатационных параметров (механическая,

Гуца Анастасия Александровна, ассистент кафедры автомобильного транспорта Полоцкого государственного университета.

Дудан Александр Витальевич, к.т.н., доцент кафедры автомобильного транспорта Полоцкого государственного университета.

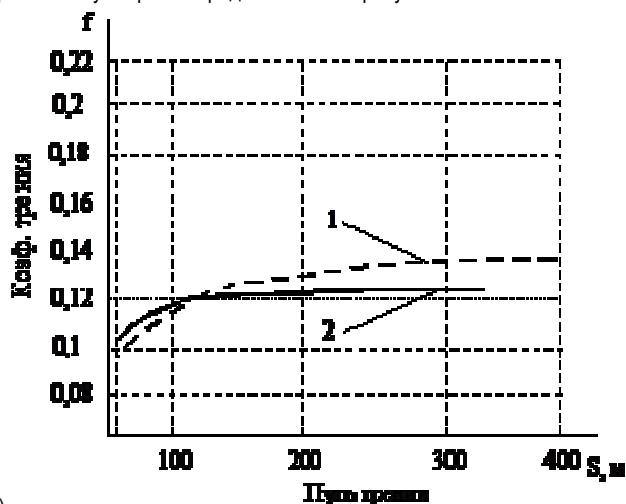
Беларусь, ПГУ, 211440, Витебская обл., г. Новополоцк, ул. Блохина 29.

Жорник Виктор Иванович, д.т.н., зав. лабораторией наноструктурных и сверхтвёрдых материалов Объединенного института машиностроения НАН Беларуси.

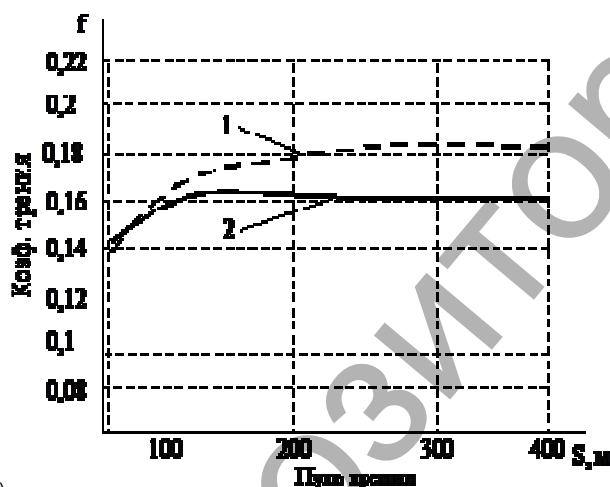
Беларусь, 220072, г. Минск, ул. Академическая, 12.

химическая и коллоидная стабильность, пенетрация, вязкость, прокачиваемость). Также необходимо отметить, что при количестве твердых добавок 1–10 мас.% композиция фактически переходит из класса пластичных смазочных материалов в класс смазочных паст.

Представленные в работе [2] результаты исследований показывают, что введение УДАГ, полученного методом детонационного синтеза в среде углекислого газа в пластичную смазку ЦИАТИМ-201, повышает её антифрикционные свойства, позволяет снизить рабочую температуру узла трения на 13–15 %, коэффициент трения скольжения на 25–32 % и уменьшить шероховатость трущихся поверхностей в 1,5–2 раза. Зависимости изменения коэффициента трения от пути трения представлены на рисунке 1.



а)



б)

Рис. 1. Зависимости изменения коэффициентов трения от пути трения для смазки ЦИАТИМ-201 при нагрузке 150 Н (а) и 250 Н (б): 1 – без наполнителя; 2 – с наполнителем УДАГ [2]

Кроме того, что пластичные смазки с добавлением порошка наноразмерного алмаза обеспечивают эффективную приработочную абразивную обработку металлических поверхностей трения, благодаря большой поверхностной энергии, а также совместимости углеродных кластеров с масляной основой они обладают высокими структурирующими свойствами. Это их качество используют для создания пластичных смазочных материалов с разветвленным структурным каркасом, обладающих высокой маслоудерживающей способностью и обеспечивающих высокую коллоидную стабильность смазки, и повышенную нагрузочную способность смазочной плёнки.

В работе [3] дополнительное введение в состав комплексной литевой смазки УДАГ в количестве 0,4–0,5 мас.% позволяет повысить ее противозадирные свойства и увеличить ее коллоидную стабильность. Причем, добавление УДАГ в дисперсионную среду (масло) и ее дезинтегрирование осуществляется перед введением в нее кислот при

температуре дисперсионной среды 70–80 °С, а дезинтегрирование проводится до размера частиц 10–30 нм. Введенные частицы УДАГ выступают в качестве центров структурообразования дисперсионной фазы пластичной смазки, что приводит к увеличению загущающей способности комплексных литевых солей и образованию разветвленного структурного каркаса (рис. 2). При этом увеличивается прочность граничного слоя смазочного материала в зоне трения и повышается маслоудерживающая способность структурного каркаса.

УДАГ в составе смазочных материалов часто применяют в сочетании с другими ультрадисперсными добавками и присадками. В этом случае характер их взаимодействия и концентрация определяют свойства смазочных материалов, а также технико-эксплуатационные показатели обработанных таким составом поверхностей трения.

Так, например, использование в смазочных материалах только ультрадисперсного порошка (УДП) железа приводит к быстрому образованию плакирующего слоя толщиной 2–4 мкм, а использование только УДА не дает слоя столь большей толщины из-за отсутствия у алмаза пленкообразующих свойств, как у металлов: толщина алмазного покрытия составляет около 0,01 мкм. В последнем случае не наблюдается размерного восстановления поверхностей трения. Кроме того, при использовании только УДП железа высок коэффициент трения на стадии приработки: 0,35 для пары сталь3-сталь3. При совместном же использовании УДП железа и УДА на поверхности трения образуется алмазо-металлический композит, сочетающий высокую твердость (устойчивость к изнашиванию), плакирующие свойства (толщина слоя до 4 мкм), а также обеспечивающий синергетический эффект (коэффициент трения на стадии приработки не превышает 0,23 для пары сталь3-сталь3) [4].

В работе [5] предложен состав пластичной смазки содержащей, мас.%: ультрадисперсный алмазографитовый порошок – 0,2–5,0, высокодисперсную соль металла – 2–15, мыльную пластичную смазку – до 100. В качестве высокодисперсионной соли могут быть использованы сульфат олова, сульфат меди, сульфат бария, сульфат свинца и сульфид бария. Пластичный смазочный материал предназначен для смазывания трущихся поверхностей в основных узлах машин и механизмов. Исследования показывают, что применение такого состава приводит к уменьшению моментов сил трения на 15–75 %, наблюдается снижение коэффициента трения в 1,5–2 раза, показатели износа и интенсивности изнашивания улучшаются на 20–80 %. В то же время нагрузочная способность возрастает на 25 %. В случае уменьшения концентрации УДАГ происходит режим трения обычный для смазки без присадок. Если концентрация будет больше 5 %, то трение переходит в режим неустойчивого граничного трения, сопровождающегося ростом коэффициента трения и износа.

Сотрудниками научно-производственного объединения «Алтай» разработана и проведена серия промышленных испытаний антифрикционной смазки для абразивной обработки материалов, в состав которой включены ультрадисперсный алмаз и дисульфид молибдена. Разработанная ими смазка содержит серу – 10–15 мас.%, дисульфид молибдена – 10–20 мас.%, инденкумароновую смолу – 5–7 мас.%, порошок ультрадисперсного алмаза или ультрадисперсионной алмазосодержащей шихты – 1–15 мас.% и стеариновую кислоту – остальное. В результате, применение смазки с кластерными алмазами позволяет повысить эффективность операции шлифования и заточки на 10–25 %, чистоту обрабатываемой поверхности в 1,5–2 раза с одновременным улучшением экологических условий ведения работ [6].

При введении 0,15–0,35 мас.% УДА и 4,8–6,7 мас.% металлосодержащей добавки в виде смеси мелкодисперсных порошков металлов (хрома, никеля, молибдена, ниобия, титана, их сплавов), оксидов или галогенидов указанных металлов в состав для обработки пар трения на основе гидросиликата магния существенно улучшаются технико-эксплуатационные показатели рабочих поверхностей трибосопряжения (для пары трения сталь45-сталь45 твердость 390–410 НRс, коэффициент трения не превышает 0,006–0,008, компенсация износа 1–3 мм) [7].

Дополнительное введение графита в количестве 2,0–4,0 мас.% и УДА в количестве 1,6–3,2 мас.% смазочную композицию на основе дисульфидмолибденовой пасты ВНИИНП-225, причем размер частиц графита составляет 0,1–1,0 мкм, а УДА имеют размер частиц

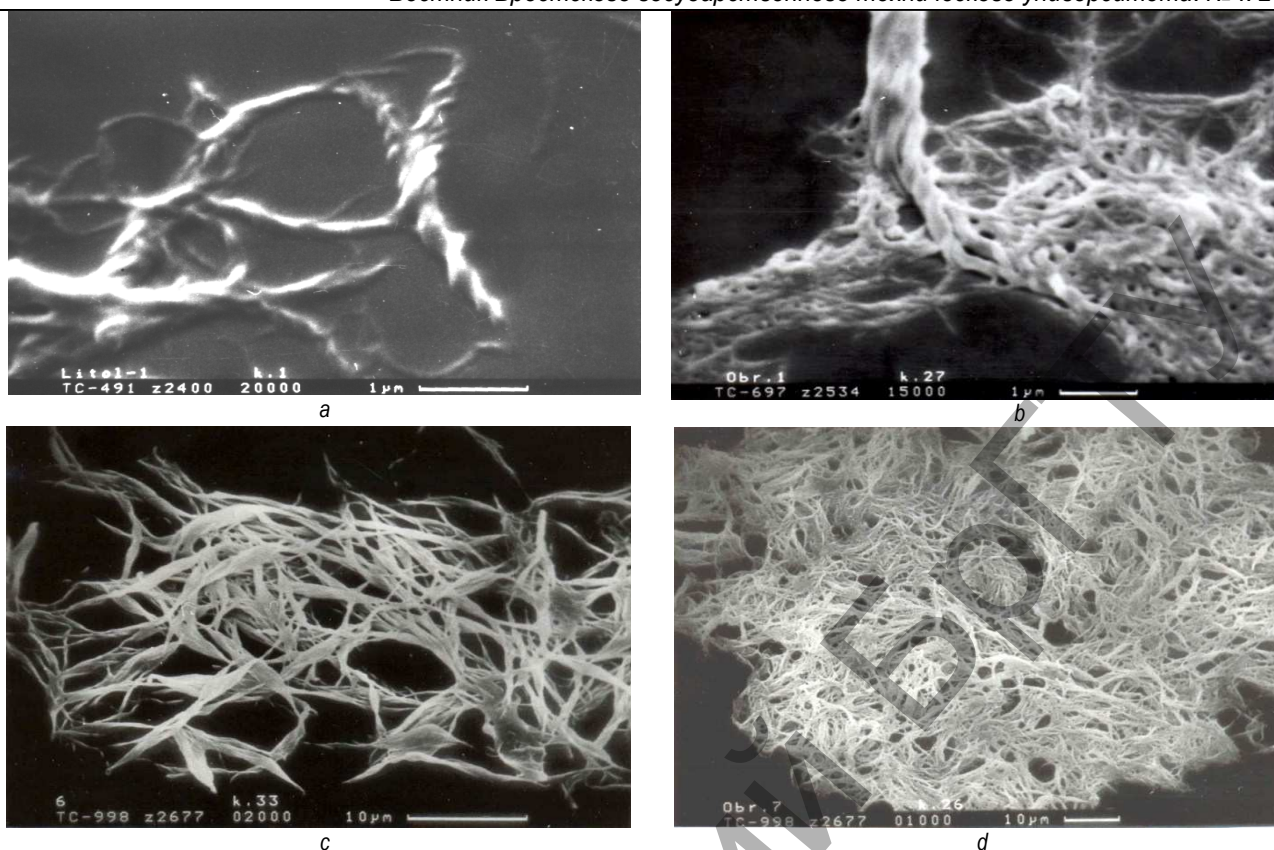


Рис. 2. Микроструктура дисперсной фазы пластичной литевой смазки Литол-24 (а, б) и пластичной комплексной литевой смазки ИТМОЛ-150 (с, д) стандартного состава (а,с) и с наноразмерной добавкой УДА (б, д) [3]

8–30 нм повышает ее противоизносные и антифрикционные свойства и расширяет диапазон ее рабочих нагрузок [8]. УДА на стадии приработки обеспечивают полировку контактирующих поверхностей трения, а в процессе дальнейшей работы способствуют деформационному упрочнению поверхностного слоя материалов сопряжения. Графит же наряду с имеющейся у него анизотропией свойств обладает высокими адсорбирующими свойствами к молекулам газов и паров. Образующаяся при этом на поверхности плотная гомогенная смазочная пленка обладает высокой несущей способностью.

**Заключение.** Модифицирование пластичных смазочных материалов наноразмерными алмазосодержащими добавками обеспечивает повышение противоизносных свойств, оказывает приработочный эффект за счет повышения твердости контактирующих поверхностей при измельчении структуры поверхности трения в процессе интенсивной пластической деформации микронеровностей под воздействием твердых частиц алмаза и в результате дисперсного упрочнения при внедрении частиц алмаза в поверхность трения. Также способствует снижению коэффициента трения в результате уменьшения шероховатости поверхности трения и частичной замене трения скольжения на трение качения. При этом значительно повышаются технико-эксплуатационные показатели в 1,5–2 раза, снижается интенсивность изнашивания трущихся поверхностей (до 50 %), температура работающих узлов (до 15 %), уровень шума и вибрации, что существенно влияет на повышение надёжности и срока службы механизмов и машин.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Смазочный материал: патент 2162878 РФ МПК С 10М 125/02 / В.П. Кобылин, И.Н. Черский, Н.Н. Платонов, В.А. Седалищев; заявитель

Институт физико-технических проблем севера СО РАН. – № 98119059/04; – заявл. 19.10.1998; опубл. 10.02.2001, бюл. № 4.

2. Повышение свойств пластичных смазочных материалов применением ультрадисперсного наполнителя / С.Г. Докшанин / ФГАОУ ВПО СФУ, г. Красноярск, РФ. – 2010. – С. 341–345.
3. Пластичная комплексная литевая смазка и способ ее получения: патент 10897 РБ МПК С10М 177/00, С 10М 169/00 / В.И. Жорник, А.В. Ивахник; заявитель ОИМ НАН Беларуси. – № а 20051170; заявл. 01.12.2005; опубл. 30.08.2008, бюл. № 4.
4. Антифрикционная присадка: патент 2225879 РФ МПК С 10М 125/00 / Л.А. Поляков [и др.]; заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие «Комбинат «Электрохимприбор». – № 042002121965/04; – заявл. 12.08.2002; опубл. 20.03.2004, бюл. № 3.
5. Пластичная смазка: патент 2163921 РФ МПК С 10М 125/00 / С.И. Щелканов [и др.]; заявитель Красноярский государственный технический университет. – № 99110709/04; – заявл. 12.05.1999; опубл. 10.03.2001, бюл. № 6.
6. Антифрикционная смазка для абразивной обработки материалов: патент 2030449 РФ МПК С 10М 125/02 / А.И. Баранов [и др.]; заявитель Научно-производственное объединение «Алтай». – № 4931340/04; – заявл. 26.04.1991; опубл. 10.03.1995, бюл. № 5.
7. Состав для обработки пар трения и способ его изготовления: патент 2168662 РФ МПК С 10М 125/02 / С.Н. Александров [и др.]; заявитель Александров С.Н. [и др.]. – № 2000115545/04; – заявл. 15.06.2000; опубл. 10.06.2001, бюл. № 4.
8. Смазочная композиция для тяжело нагруженных узлов: патент 5906 РБ МПК С10М 169/04 / П.А. Витязь, В.И. Жорник, В.А. Верещагин, Н.Е. Гильнич; заявитель ОИМ НАН Беларуси. – № а 20000276; заявл. 27.03.2000; опубл. 30.03.2004, бюл. № 3.

Материал поступил в редакцию 07.12.15



Presents the main research results of leading research centers and experts in the field of modification of lubricants nano diamond-mi. The analysis showed that this method of tribologically can significantly reduce the intensity of wear of friction surfaces (50 %), improve technical-operational indicators in 1,5–2 times that significantly affects the increase of reliability and resource of friction units of machines and mechanisms.

УДК 621.793.620.172

**Дудан А.В., Ворона Т.В., Агеев М.С., Ляшенко Б.А.**

## ПРИМЕНЕНИЕ ГИБРИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РЕНОВАЦИИ И ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ДЕТАЛЕЙ СУДОВЫХ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

**Введение.** Развитие современного морского и речного (водного) транспорта неразрывно связано с проблемой повышения долговечности деталей судовых машин и механизмов (СММ) [1–3]. Большинство отказов СММ происходит в результате поверхностного разрушения и в первую очередь от изнашивания. Причиной, обуславливающей снижение надежности рабочих параметров СММ, является износ их деталей. Судоремонтные предприятия расходуют более 40% всего потребляемого металла на изготовление запасных деталей различных узлов, в шихту сдается до 300 тыс. деталей при износе сопрягаемых поверхностей 0,5...2,0 мм и потере массы 3,5% [1–3]. Разработку эффективных способов борьбы с износом, увеличения долговечности деталей с целью повышения ресурса СММ можно отнести к одним из важных проблем судостроительной отрасли [1–3].

Исследования в области трения, изнашивания и принципиально новых типов материалов явились предпосылкой для создания на этой основе новых способов и технологий, направленных на решение вопросов увеличения долговечности быстроизнашиваемых деталей СММ.

Цель исследований – дать характеристику интегрированных технологий упрочнения (восстановления), а также показать перспективу их развития; предложить гибридный (комбинированный) способ повышение ресурса и реновации деталей судовых машин и механизмов.

Результаты исследований. Одним из путей повышения работоспособности деталей СММ и защиты контактных поверхностей от износа является нанесение износостойких покрытий на их рабочие поверхности [4]. Характерной особенностью технологий нанесения покрытий является то, что не удается получить одновременного повышения всех свойств детали для всех режимов эксплуатации. Даже один и тот же материал покрытия, но нанесенный разными способами, показывает различные эксплуатационные свойства. Для устранения этого недостатка при разработке покрытий используют два метода [5].

1) создание многослойных покрытий вплоть до мультипликаций; каждый слой в многослойном покрытии выполняет собственную функцию и обеспечивает плавный переход физико-механических свойств от поверхности покрытия к упрочняемой (восстанавливаемой) поверхности детали;

2) создание многокомпонентных слоев переменного состава по толщине покрытия.

Оба метода значительно удорожают технологию получения покрытия и снижают надежность получения покрытия высокого качества, так как брак в одном из слоев приводит к снижению качества всего покрытия.

В попытках устранения недостатков этих методов получения покрытий наблюдаются две основные тенденции [5]:

- нанесение многослойных, многофункциональных покрытий;
- развитие интегрированных многооперационных технологий.

Из интегрированных технологий наибольший эффект по несущей способности обеспечивают дуплексные покрытия, сочетающие предварительное глубокое ионное азотирование и наружный тонкий слой сверхтвердого вакуум-плазменного покрытия. Подобная интегрированная технология обеспечила 10-кратное повышение долговечности игольчатых клапанов запорной арматуры, которые изготовлены из стали 12Х18Н10Т и эксплуатируются в условиях высоких контактных дав-

лений и агрессивных технологических расплавах [5]. Находят применение интегрированные технологии в комбинации лазерного легирования и химико-термической обработки [5]. Эта комбинация позволяет получать за счет выделения упрочняющих дисперсных фаз твердость до 20 ГПа и приводит к увеличению износостойкости в 1,5–3 раза по сравнению с азотированными нитрослоями стали 38Х2МЮА [5]. Азотированный слой, предварительно легированный Cr и V, имеет твердость 16–18 ГПа. Лазерное легирование алюминием обеспечивает сильно развитую полигонизированную структуру, что ускоряет диффузию азота. При этом твердость достигает 21 ГПа [5]. В сравнении с технологиями газового азотирования или дискретно-лазерной обработкой износостойкость при интегрированной технологии повысилась в 2,5 раза [5]. Предварительная дискретная лазерная обработка вносит существенный вклад в процесс последующего газового азотирования [5]. При этом качественный и количественный характер изменений в азотированном слое определяется заранее сформированным структурно-фазовым состоянием. Повышенная растворимость азота в кристаллической решетке стали при обработке ее поверхности лазерным лучом, является следствием образования высокой плотности подвижных дислокаций, а также сильного диспергирования исходной структуры зерен. При этом процесс насыщения поверхности азотом ускоряется в 17 раз [5].

Перспективным является поверхностное упрочнение (восстановление) комплексными или комбинированными методами нанесения износостойких покрытий, нанесение покрытий с модифицированием поверхности и т.д. [5]. Комбинированное упрочнение (восстановление деталей) основано на использовании двух или трех методов упрочнения (восстановления), каждый из которых позволяет усилить то или иное их эксплуатационное качество. Применяют комбинации наплавки и хромирования [5], наплавки и поверхностного пластического деформирования [5], газотермическое напыление с оплавлением, с лазерным оплавлением [5]. Используют комбинацию гальванических покрытий и последующую химико-термическую обработку [5], двухслойное хромовое покрытие с последующей механической обработкой и упрочнением [5]. Повышают триботехнические характеристики композиционных электролитических покрытий лазерной обработкой [5], ультразвуковой обработкой [5], ионным азотированием [5]. При ультразвуковой обработке размер зерен в покрытии зависит от интенсивности обработки, меняясь от 45 нм до 24 нм [5]. Ионное азотирование повышает износостойкость при абразивном изнашивании за счет превращения электроосажденного хрома в нитрид Cr<sub>2</sub>N [5]. Определен механизм влияния термообработки на упрочнение электроосажденного Fe-B-покрытия, обеспечивающий повышение износостойкости [5]. Технология восстановления изношенных деталей электролитическим железнением с последующей нитроцементацией обеспечивает высокие эксплуатационные характеристики – прочность сцепления, износостойкость, усталостную прочность [5]. Эффективно сульфацирование электроосажденного Fe-B-покрытия, обеспечивающее повышение износостойкости и снижение коэффициента трения [5]. Комбинация лазерной обработки с ионным азотированием существенно увеличивает азотируемость сталей, глубину упрочненной зоны и повышает износостой-

**Ворона Т.В., Кировоградский национальный технический университет, Украина.**

**Агеев М.С., к.т.н., доцент, Херсонская государственная морская академия, Украина.**

**Ляшенко Б.А., д.т.н., профессор ИГП им. Г.С. Писаренко НАНУ, Украина.**