

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 механической обработкой покрытий, нанесение покрытий с модифицированием поверхностей 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 ИПП им. Г.С. Писаренко НАНУ, Украина.**

кость [5], обеспечивает повышение твердости в сравнении с ионным азотированием. Электроискровое легирование, как и лазерные технологии, относится к способам, использующим высококонцентрированные энергетические источники. Поэтому эффективна также комбинация электроискрового легирования с последующим ионным азотированием [4–5]. Этим существенно увеличивается глубина слоев повышенной твердости. А вот комбинация лазерной и электроискровой обработки обеспечивает крайне незначительный эффект [4–5]. Отмечают существенное повышение износостойкости модифицируемых материалов сочетанием методов ионной, электронно-лучевой и лазерной обработки [4–5]. В комбинациях технологий электроискровой, лазерной и электронно-лучевой обработки с ионным азотированием наблюдается эффект неаддитивности.

Предварительная обработка этими первичными технологиями существенно увеличивает азотируемость сталей, глубину упрочненного слоя и обеспечивает многократное повышение твердости и износостойкости в сравнении с ионным азотированием.

По данным Института электросварки им. Е.О. Патона, в США и Западной Европе комплексные или комбинированные методы нанесения покрытий получили название «гибридные процессы» упрочнения [5]. В настоящее время в практике восстановления (упрочнения) нашли применение следующие «гибридные процессы» [4–5]:

- сочетание химико-термической обработки с поверхностным пластическим деформированием (азотированием с дробенаклепом, азотирование с холодной накаткой, цементирование с поверхностным пластическим деформированием, в частности наклепом дробли);
- химико-термическая обработка с последующей электроконтактной обработкой (легирование бором и углеродом с последующей электроконтактной обработкой);
- волочение при воздействии импульсов тока (электростимулированное волочение);
- газотермическое напыление с последующей холодной прокаткой;
- электромагнитная наплавка с последующей термомеханической обработкой (поверхностным пластическим деформированием);
- пластическое деформирование с диффузионным насыщением (прокатка с диффузионным насыщением при газовой цементации);
- поверхностное пластическое деформирование (ППД) с печным нагревом или электронагревом (дробеструйная обработка и электронагрев);
- ППД с электроимпульсной обработкой (электроимпульсное деформирование при прокатке);
- ППД с микродуговым оксидированием (МДО);
- лазерная закалка с пластическим деформированием;
- плазменное напыление с последующим горячим изостатическим прессованием;
- напыление с наложением вибраций или нагревом;
- упрочнение гальванических покрытий ППД;
- цементация с последующим дробеструйным упрочнением;
- лазерная закалка или легирование с ППД;
- лазерно-ультразвуковое легирование;
- ультразвуковая обработка газотермических покрытий;
- лазерная обработка плазменных покрытий;
- электронно-лучевая обработка электролитических хромовых покрытий;
- электронно-лучевой нагрев детонационных покрытий;
- лазерное упрочнение ионно-азотированного слоя;
- лазерная обработка борированных поверхностей;
- лазерная закалка после цементации;
- химико-термическая обработка лазерно-легированных сталей.

В настоящее время еще не разработана методология синтеза многооперационных технологий. В интегрировании технологий преобладает эмпирически-интуитивный подход.

Следует отметить явление инверсии, когда изменение последовательности операций упрочнения приводит к отличающимся результатам. Естественно, оптимальный выбор операций и их последовательность определяется повышением твердости комплекса ме-

ханических свойств, износостойкости, а также шероховатости поверхности и точности размеров детали. Предварительную химико-термическую обработку целесообразно использовать для подготовки поверхности под электроискровое легирование, а финишное электроискровое легирование цементированных и азотированных поверхностей обеспечивает дополнительное повышение твердости и износостойкости [4–5]. Различная последовательность электроискрового легирования и азотирования позволяет управлять распределением микротвердости в легированном слое, а именно – положением максимума в приповерхностном слое [4–5]. Отмечают инверсию в комбинации лазерной обработки и ионного азотирования [4]. Лазерная обработка азотированного слоя обеспечивает более плотный оксинитридный слой под поверхностью, а также увеличение глубины азотированного слоя [4–5]. В наноструктурированном поверхностном слое после шлифования азотированный слой вдвое толще, чем на крупнозернистой поверхности в тех же условиях азотирования, что объясняется ускорением диффузии азота вдоль границ зерен в наноструктурном железе [5]. Финишная дробеструйная обработка азотированного слоя повышает износостойкость и предел выносливости зубчатых передач [5].

Во всех вариантах комбинированных (гибридных) технологий критерием выбора является сравнение затрат и увеличение комплекса механических свойств упрочненных изделий [5].

Каждая технология поверхностного упрочнения (восстановления) имеет свою нишу оптимальных условий использования, включая даже технологические традиции, сложившиеся на конкретном предприятии. Решающим фактором в выборе первичных технологий является наличие на предприятии отдельных видов оборудования и возможность интегрировать их в единый технологический цикл.

Из многообразия первичных технологий, самые массовые технологии, применяемые в машиностроении, и в частности, в судостроении и судоремонте – газотермические методы напыления (ГТН) [6–7]. Внедрение ГТН в судостроении начало развиваться в конце 80-х прошлого столетия. В судостроительной отрасли в 80-е годы создавались участки по производству деталей с плазменными, детонационными и электродуговыми покрытиями. Однако в 90-е годы в связи с изменением экономического положения внедрение ГТН при изготовлении деталей практически прекратилось. Плазменное и детонационное напыление, на которое делалась основная ставка в повышении ресурса деталей судового машиностроения, требовало больших затрат: высокая стоимость оборудования, применение дорогостоящих газов, отсутствие достаточного научно-технологического обеспечения и квалифицированных кадров привело практически к остановке работ по ГТН. За рубежом в это время интенсивно проводились работы по применению ГТН, разрабатывалась новая техника напыления. Например, сверхзвуковые системы, с помощью которых получают покрытия с высокой прочностью. Стоимость этих систем в 5–10 раз выше стоимости серийного оборудования отечественного производства. Электродуговое напыление (ЭДН) аппаратами отечественного производства отличаются простотой, дешевизной и высокой производительностью [8]. В связи с этим, внедрение электродугового напыления для повышения ресурса и восстановления деталей СММ с целью обеспечения сменно-запасными частями судоремонтных предприятий является актуальным.

ЭДН применимо для восстановления изношенных чугунных, высокоуглеродистых и высоколегированных стальных деталей цилиндрической формы с изношенными посадочными местами и деталей плоской формы из цветных металлов, работающих в условиях трения скольжения и смазки, защиты от коррозии наружных и внутренних поверхностей резервуаров и сварных металлоконструкций различного назначения путем напыления алюминия и цинком [8]. ЭДН восстанавливаются размеры опорных шеек распределительных и коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания [8].

Высокие свойства покрытий при электродуговом напылении (ЭДН) достигаются применением композиционных порошковых проволок. К их числу можно отнести порошковую проволоку ФМИ, разработанную в Физико-механическом институте им. Г.В. Карпенко НАН Украины (г. Львов, Украина) [9]. Защита от окисления и высокие

свойства покрытий достигаются за счет взаимодействия компонентов порошковой шихты между собой, при этом происходят процессы восстановления оксидов и легирования стальной основы. При ЭДН технологически возможно применение любой марки проволоки, выпускаемой промышленностью для различных целей. Однако наибольшее применение находят композиционные порошковые проволоки, оболочка которых изготовлена из сталей Св 08, Св 08 Г2С, 30ХГСА, Сталь 70, У8, У10, 20Х13, 40Х13, 65Г, а наполнитель – ферросплавы, карбиды, карбобориды. Покрытия, полученные напылением порошковых проволок, имеют большую твердость и износостойкость. Практика применения порошковых композиционных проволок при газотермическом напылении показывает, что эксплуатационные свойства покрытий из порошковых проволок выше, чем из однородных. Преимущества порошковых проволок обуславливаются не только гетерогенной структурой покрытия после напыления, но и активным взаимодействием компонентов порошковой шихты друг с другом при напылении и с подложкой, что способствует повышению температуры частиц, раскислению оксидов на поверхности подложки, и, как следствие, повышение адгезии покрытия к подложке. Однако такое уменьшение размера расплавленных частиц напыляемого материала ведет к более интенсивному выгоранию из них легирующих элементов, в первую очередь углерода, что обуславливает повышенную твердость покрытий при дозвуковых скоростях истечения воздуха. Содержание остальных легирующих элементов проволоки при увеличении скорости истечения воздуха из электродугового аппарата и тока дугового разряда изменяется в меньшей степени. Однако наши исследования показали, что с повышением содержания углерода в распыляемой композиционной проволоке механические свойства покрытия повышаются, а прочность сцепления незначительно снижается. При напылении стали У8 твердость покрытия составляет 360...380 НВ, прочность сцепления составляет 18...20 МПа.

При напылении малоуглеродистых нелегированных проволочных материалов покрытие имеет низкий уровень механических свойств. Твердость металла и оксидов различна и составляет 210...280 НВ и 400...560 НВ соответственно. Покрытие характеризуется высокой внутренней хрупкостью из-за наличия большого количества оксидов (до 20%), высоким коэффициентом трения  $f=0,4...0,6$  и невысокой износостойкостью [7]. Прочность сцепления с подложкой не превышает 22...24 МПа. Пористость покрытия находится в диапазоне 13...18 %. Структура покрытий представляет собой слоистую систему, состоящую из вытнутых зерен (ламелей), фазовый состав которых соответствует твердому раствору хрома в  $\alpha$ -железе, с мелкодисперсными включениями сложнелегированных боридных соединений хрома и железа.

Легированные и высоколегированные проволочные материалы позволяют получать наилучшие свойства ЭДН-покрытий из всех однородных проволочных материалов [7]. Значительное повышение свойств обусловлено упрочняющим действием легирующих элементов в стали. Хром способствует повышению прокаливаемости стали при быстром охлаждении, поэтому структура покрытий из хромистых сталей состоит в основном из мартенсита и продуктов его отпуска. При значительном содержании хрома в исходной проволоке в покрытии образуются карбиды Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, а также небольшое количество аустенита. Хром в значительной степени повышает коррозионную стойкость покрытий, а также адгезию покрытия к смазке. На прочность сцепления покрытий хром в чистом виде влияние не оказывает. При электродуговом напылении хром практически не выгорает. Никель находит широкое применение в сплавах для защитных покрытий. Он неограниченно растворим в железе и является сильным аустенизирующим элементом. Собственных высокотвердых фаз в сплавах железа никель не образует. Его влияние заключается в существенном повышении стойкости покрытий к ударным нагрузкам. С увеличением содержания никеля повышается вязкость сплава практически без ущерба для износостойкости. Никель – дорогой легирующий элемент, поэтому его количество в износостойких сплавах на основе железа ограничивают. Исключением составляют сплавы для коррозионностойких покрытий, в которых никель применяют в качестве основы сплава. В этом случае достигаются высокие показатели коррозионной стойкости и износостойкости, а также технологичность нанесения покрытия благо-

даря образованию в системе М-Сr-В гетерогенной структуры эвтектического типа с низкой температурой плавления (менее 1000°С). Однако высоколегированные проволочные материалы по стоимости приближаются к порошковым проволочным материалам.

Главные недостатки напыленных покрытий – низкая прочность сцепления и высокая пористость [7]. Улучшают эти свойства лазерной обработкой, электронно-лучевым упрочнением, оплавлением и химико-термической обработкой [7].

Наиболее многообразны исследования лазерного упрочнения покрытий [7]. Проанализированы области использования лазерного улучшения свойств напыленных покрытий. Благодаря оптимизации параметров лазерной обработки напыленных электродуговых покрытий получают мелкокристаллическую беспористую структуру с равномерным распределением химических элементов. Этим существенно повышается износостойкость в условиях граничного трения и абразивного изнашивания. Достигают повышения адгезионной и когезионной прочности покрытия при его наноструктурировании. Лазерная обработка напыленных покрытий повышает их стойкость к высокотемпературной газовой коррозии и коррозии в расплаве V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. С целью снижения энергетических затрат используют способ легирования поверхности совместной обработкой лазерным лучом и плазмой [7]. Лазерное оплавление напыленных покрытий увеличивает микротвердость в 2 раза, износостойкость в 1,3–1,8 раза.

Оплавление напыленных покрытий осуществляют токами высокой частоты, высокоскоростной импульсно-плазменной струей, в вакуумных печах [7]. Существенный эффект многократного повышения микротвердости и износостойкости обеспечивает электронно-лучевая обработка напыленных покрытий [7]. Анализ структуры показал, что средний размер зерен в покрытии уменьшается от сотен мкм до сотен нанометров, а микротвердость увеличивается в 5 раз. Предел выносливости повышается на 60–80%, а прочность сцепления – в 2,5...3,5 раза после электронно-лучевой обработки [7].

Для повышения триботехнических характеристик напыленных покрытий используют ультразвуковую обработку, в том числе одновременно с плазменным напылением [7].

Эффективно применение химико-термической обработки после напыления. После борирования износостойкость напыленных покрытий из стали Св-08 при сухом трении повысилась в 10 раз. Повысилась также адгезионная прочность напыленных покрытий. Ионное азотирование напыленных из сталей 40Х13 и Х18Н10Т покрытий обеспечивало их микротвердость от 6,5 до 15 ГПа. При этом износостойкость увеличилась в 8 раз [7].

В условиях всё возрастающего дефицита дорогостоящих легирующих материалов, входящих в состав сталей, требующих высокого комплекса прочностных свойств, перспективными для электродугового напыления являются малоуглеродистые низколегированные стали. При ЭДН происходит выгорание углерода и снижение твердости и износостойкости покрытий. С целью использования при ЭДН дешевых сталей, но при этом получать покрытия с высокой твердостью, нами была предложена гибридная (комбинированная) технология ЭДН с последующим термоциклическим ионным азотированием (ТЦ ИА) (рис. 1).

При восстановлении (упрочнении) поверхностей деталей ЭДН необходима предварительная обработка напыляемой поверхности для обеспечения надежного контакта расплаваемого материала и основного металла путем активации поверхностного слоя основы и удаления загрязнений. Предварительная обработка поверхности основного металла выполняется разнообразными технологическими методами. На первой стадии подготовки поверхности проводится обезжиривание для удаления различных загрязнений. Далее следует механическая обработка поверхности. Среди всех методов наиболее производительными являются обработка дробью, обдувка песком, нарезание рваной резьбы, нанесение различной формы насечек (таблица 1). При разработке гибридной технологии ЭДН+ТЦ ИА мы предложили предварительную обработку поверхности перед напылением производить электроискровым легированием ЭИЛ (рис. 1, а, б).

Процесс упрочнения (восстановления) деталей судовых машин и механизмов гибридной (комбинированной) технологией ЭИЛ+ЭДН+ТЦ ИА представлен на рисунке 1.

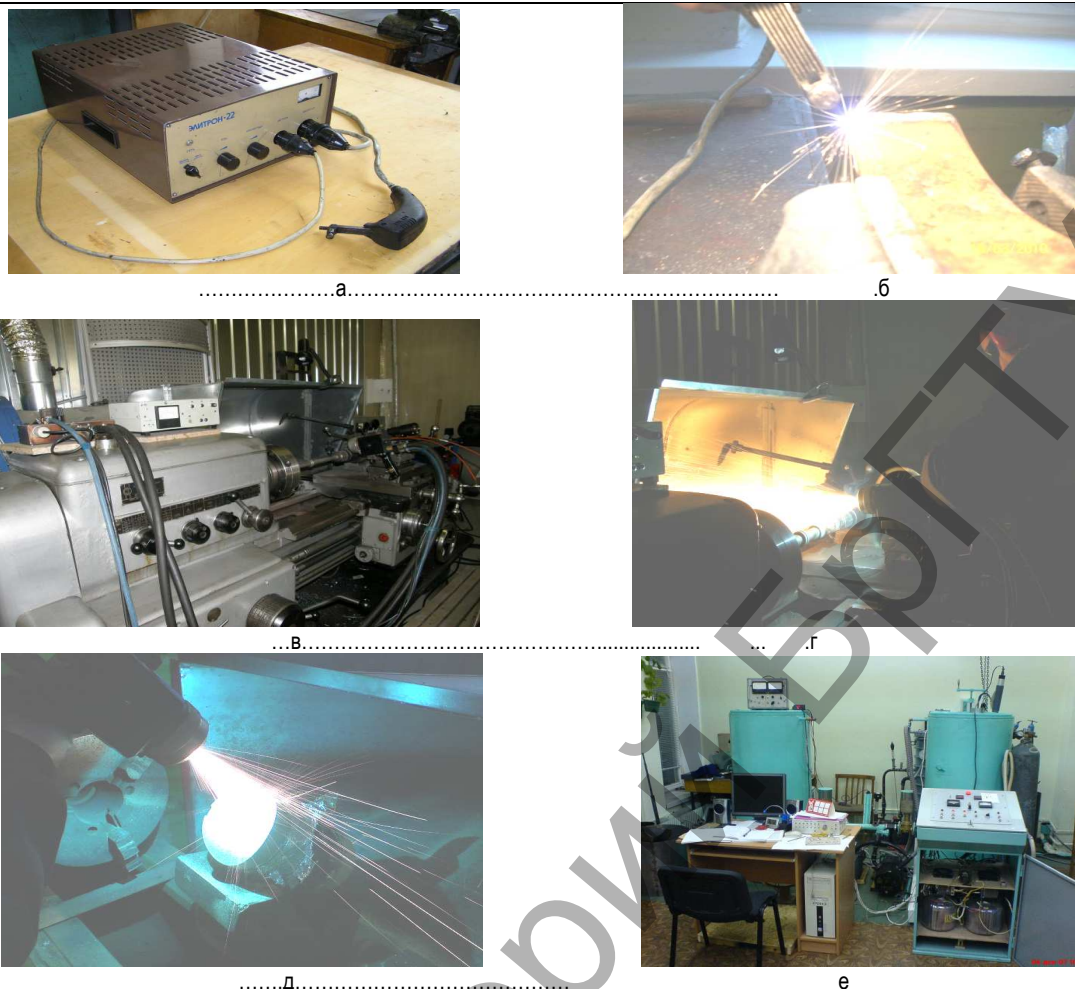


Рис. 1. Пример участка интегрированной технологии нанесения покрытий: а, б) электроискровое легирование (ЭИЛ); в, г) электродуговое напыление (ЭДН); д, е) термоциклическое ионное азотирование (ТЦ ИА)

Таблица 1. Влияние способа подготовки поверхности при ЭДН на прочность сцепления и эффективный коэффициент концентрации напряжений

Способ подготовки	Прочность сцепления с основой, МПа	Эффективный коэффициент концентрации напряжений
Обработка дробью	22	0,78
Обдувка песком	20	0,91
Нарезание резьбы	23	1,3
Нанесение насечек	22	1,29
Электроискровая	23	1,08

**Заключение.** Как показывает отечественный и зарубежный опыт, восстановление-упрочнение деталей СММ наиболее эффективно путем нанесения на рабочие поверхности защитных покрытий с помощью гибридных (комбинированных) технологий. Создание технологических процессов с применением комбинированных (гибридных) технологий является достаточно актуальной задачей и может сделать судостроительное и судоремонтное производство рентабельным.

Предложено для реновации и повышения ресурса деталей СММ использовать впервые разработанную гибридную (комбинированную) технологию электродугового напыления (ЭДН) в комбинации с электроискровым легированием (ЭИЛ) и термоциклическим ионным азотированием (ТЦ ИА). Гибридная технология ЭИЛ+ЭДН+ТЦ ИА обладает рядом преимуществ:

- повышаются физико-механические свойства напыленного слоя, в частности, прочность сцепления, плотность, твердость и изно-

стойкость. Электроискровое легирование несет функцию предварительной обработки напыляемых поверхностей и повышает прочность сцепления напыляемых слоев. Операцию ТЦ ИА напыленного покрытия можно совместить с финишной обработкой до требуемой твердости и чистоты упрочняемой (восстанавливаемой) поверхности детали;

- снижается стоимость упрочнения (восстановления) деталей за счет снижения стоимости покрытий путем замены дорогих порошковых проволок на более дешевые низколегированные углеродистые стальные проволоки.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кузьмин, А.А. Судостроение и судоремонт: сборник научных трудов. С.-Петербург. гос. ун-т вод. коммуникаций. – СПб: Изд-во СПбГУВК 2000. – 189 с.
2. Половинкин, В.Н. Новые высокие технологии на пути к внедрению в судостроении. Успехи ожидаемые и неожиданные: материалы конференции. – СПб.: Моринтех, 2001. – С. 9–10.
3. Сторожев, В.П. Восстановление деталей судовых технических средств / В.П. Сторожев // Серия «Судоремонт» 1990. – Вып. 1(17) – С. 1–60.
4. Покрытия и их использование в технике // В кн. «Прочность материалов и конструкций», п/ред. В.Т. Троценко – 2-е изд. – К.: Академперіодика, 2006. – С. 981-1074.
5. Ляшенко, Б.А. Повышение долговечности быстроизнашиваемых деталей рабочих органов сельскохозяйственной техники интегрированными технологиями упрочняющих защитных покрытий. Констрування, виробництво та експлуатація сільськогосподарські машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-



- технічний збірник / Б.А. Ляшенко, Л.А. Лопата, Е.К. Соловых, А.Е. Соловых, А.В. Ворона. – Вып. 41. – Часть 2. – Кировоград, 2011. – С. 73–79.
6. Дубчак, В.С. Опыт Мурманского СПЗ по восстановлению деталей методами газотермического напыления / В.С. Дубчак. – В/О «Мортехинформреклама» // Серия «Судоремонт». – Вып. 20. – Москва, 1987. – С. 1–10.
7. Дорожкин, Н.Н. Применение активированной электродуговой металлизации для нанесения антикоррозионных покрытий / Н.Н. Дорожкин, В.Э. Барановский, А.П. Елистратов, А.С. Прядко // Морской транспорт. Серия «Судоремонт», Э.-И. – Вып. 2(531). – 1985. – С. 9–12.
8. Витязь, П.А. Упрочнение газотермических покрытий / П.А. Витязь, Р.О. Азизов, М.А. Белоцерковский – Мн.: Бестпринт, 2004. – 192 с.
9. Похмурська, Г.В. Зносостійкість лазерно модифікованих електродугових поривів з порошкового дроту ФМІ-2 / Г.В. Похмурська, В.М. Довгунік, М.М. Студент // ФХММ – 2003 – № 4. – С. 61–64.

Матеріал поступил в редакцію 16.11.15

**DUDAN A.V., VORONA T.V., AGEEV M.S., LYASHENKO B.A. Application of hybrid technology for renovation an increased resource details of ships and machinery**

It presents various combinations of primary hardfacing technology for the renovation and improvement of the resource details of ship machinery. Currently, promising are integrated or combined methods hard facing (hybrid technology) coating in conjunction with the modification, the application of multi-layer, multi-functional coatings; development of integrated multioperational technologies. In all conditions, increasing scarcity of expensive alloying materials included in the composition of steels requiring high strength properties of the complex, are promising hybrid technology peening (restore) the surfaces of mild steel.

УДК 519.876.5

**Нерода М.В., Наранович О.И., Шах А.В.**

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА В ЭЛЕМЕНТАХ ТРУБОПРОВОДА

**Введение.** Задача создания трехмерных моделей трубопроводов возникает при проектировании оборудования различных отраслей машиностроения, при создании различных гидравлических систем, в нефтегазовой промышленности при создании трубопроводной обвязки, а также при проектировании различных инженерных коммуникаций, подводок и шлангов.

Широкое распространение трубопроводов в промышленности и быту заставляет проектировщиков более тщательно подходить к выполнению сборки, выбору материала при создании отдельных элементов конструкции и тестированию эксплуатационных характеристик.

Часто под действием различных факторов, таких как износ материала деталей трубопровода, значительный напор жидкости, подаваемой через трубу, внезапное перекрытие крановой задвижки и следующего за ним гидравлического удара жидкости, происходит разрыв труб и деформация функциональных элементов, приводящих к выходу из строя системы (рис. 1).



**Рис. 1.** Пример повреждения трубопровода в результате гидравлического удара

Одним из распространенных факторов, вызывающим повреждение системы, является гидравлический удар – это скачкообразное изменение давления жидкости, протекающей в напорном трубопроводе, возникающее при резком изменении скорости потока. В более развернутом смысле, гидравлический удар представляет собой быстротечное чередование «скачков» и «провалов» давления, сопровождающееся деформацией жидкости и стенок трубы, а также акустическим эффектом, похожим на удар молотком по стальной трубе.

Актуальность выбранной темы состоит в том, что возникающие переходные режимы и сопровождающие их волновые процессы становятся причиной разрушения трубопроводов, арматуры, поломки насосов или других нарушений нормальной работы установок, и, таким образом, компьютерное моделирование и изучение воздействия гидравлических ударов позволит повысить надежность и эффективность работы гидравлических систем, что, в более широком плане, повысит их конкурентоспособность.

Для защиты трубопроводов от гидравлических ударов решающее значение имеют совершенные методы расчета и надежная конструкция противоударных устройств, а также правильная их эксплуатация. Метод расчета должен позволять получить достаточно точные значения ударных давлений на протяжении всего трубопровода.

Объект исследований. Объектом исследования был выбран линейный трубопровод, оборудованный на одном конце регулирующим органом (насосом или задвижкой), а на другом конце регулирующим резервуаром. Около насосов, как правило, устанавливаются обратные клапаны. Материал изготовления элементов трубопровода – сталь.

Предметом исследования является изучение возможности применения компьютерных систем конечноэлементного анализа для моделирования процессов деформации элементов трубопровода в результате гидравлического удара.

Результаты построения модели в среде Solidworks 2009 представлены на рисунке 2.

**Нерода Михаил Владимирович**, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой технологии машиностроения инженерного факультета Барановичского государственного университета.

**Наранович Оксана Ивановна**, к.ф.-м.н., доцент, заведующая кафедрой информационных систем и технологий инженерного факультета Барановичского государственного университета.

**Шах Александр Васильевич**, м.т.н., преподаватель кафедры информационных систем и технологий инженерного факультета Барановичского государственного университета.

Беларусь, БарГУ, 225404, Брестская обл-ть, г. Барановичи, ул. Войкова, 21.