

УДК 621.1

## Воздушно-плазменное напыление кавитационно- и гидроабразивностойких покрытий\*

В.И. Кузьмин<sup>1</sup>, И.П. Гуляев<sup>1</sup>, Д.В. Сергачёв<sup>1</sup>, С.П. Ващенко<sup>1</sup>,  
Б.В. Палагушкин<sup>2</sup>, А.О. Токарев<sup>2</sup>, М.Г. Мензилова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

<sup>2</sup>Сибирский государственный университет водного транспорта,  
Новосибирск

E-mail: vikuzmin57@mail.ru

Приведены результаты работы по воздушно-плазменному напылению кавитационно- и гидроабразивно-стойких покрытий из порошковых материалов. Предложен метод лабораторных (стендовых) испытаний покрытий на стойкость в условиях контактно-импульсных нагрузок. Стенд представляет собой лабораторный копёр, производящий удары по индентору, находящемуся в постоянном контакте с испытуемым образцом. Мерой оценки повреждения поверхности, упрочнённого износостойким покрытием, служит диаметр лунки, создаваемой индентором. Моментом разрушения покрытия считается появление в нем трещин и отслоение. Разработанная методика стендовых испытаний при контактно-импульсном нагружении износостойкого покрытия имитирует условия работы лопастей высокооборотного гребного винта водометного движителя на мелководье. Метод воздушно-плазменного напыления порошковых материалов в качестве защитных покрытий прошёл успешное опробование при упрочнении лопастей гребного винта водометного движителя речного теплохода проекта «КС-101Д».

**Ключевые слова:** воздушно-плазменное напыление, плазматрон с секционированной межэлектродной вставкой, узел кольцевого ввода порошковых материалов, осесимметричный гетерогенный поток, кавитационное и гидроабразивное изнашивание, контактно-импульсные нагрузки, износостойкие покрытия, адгезия, когезия, пористость.

### Введение

Впервые кавитационная эрозия гребных винтов была обнаружена в конце XIX века при испытаниях судов английского военно-морского флота [1]. Явление кавитации вызывается образованием в воде пузырей воздуха в областях пониженного давления вблизи поверхности лопастей винтов и последующей их высокоскоростной имплозией (схлопыванием). Оказалось, что интенсивная эрозия гребных винтов вследствие кавитации снижает их прочностные характеристики и является основным фактором, ограничивающим срок их службы. Кроме этого, кавитационные разрушения поверхности лопастей гребных винтов приводят к снижению пропульсивной эффективности движителей, снижению скорости судов и заметному увеличению расхода топлива. При движении судов

\* Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы (проект АААА-А17-117030610120-2).

в условиях мелководья дополнительно появляется проблема гидроабразивного и ударно-абразивного износа. По интенсивности разрушений износ от воздействия частиц песка, ила и гравия в потоке воды может существенно превосходить кавитационную эрозию [2]. При этом кавитационно-абразивный износ в водных потоках с твердыми частицами обладает синергичным эффектом, то есть превышает суммарный износ от индивидуального действия этих механизмов. Особенно ситуация усугубляется в высокотурбулентных условиях.

Для защиты лопастей гребных винтов от указанных видов разрушений в 1980-х годах была разработана технология плазменного напыления самофлюсующихся порошковых никелевых (Ni/B/Si) и никель-хромовых (Ni/Cr/B/Si) сплавов с последующим газопламенным оплавлением [3]. Данные сплавы обладают стойкостью к коррозии в пресной и морской воде (хромовые сплавы), к изнашиванию трением и абразивными частицами, твердостью на уровне 400–600 HV. Оплавление нанесённых плазменным напылением покрытий, имеющих пористость до 15–18 % и низкий уровень адгезии и когезии, являлось обязательной операцией технологического процесса [4]. Это требование было вызвано сравнительно низкими техническими характеристиками напылительного оборудования того времени, которое обеспечивало значения скорости напыляемых частиц на уровне 150–200 м/с. Важно подчеркнуть, что трудоемкость и продолжительность операции оплавления самофлюсующегося покрытия в несколько раз превышает этап плазменного напыления. Тем не менее на многих производственных и ремонтных участках данная технология применяется до сих пор.

Развитие технологий газотермического напыления привело к широкому распространению новых защитных покрытий на основе карбидов вольфрама WC и хрома Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> [5, 6]. Основными методами нанесения таких покрытий являются методы высокоскоростного газопламенного напыления HVOF и HVAF. Высокая скорость напыляемых частиц — на уровне 800 м/с — позволяет формировать покрытия с пористостью 1 % и менее, микротвердостью на уровне 1200–1400 HV, что обеспечивает превосходные показатели защиты от абразивного и кавитационного износа. В то же время и карбидные материалы, и напылительное оборудование HVOF/HVAF имеют высокую стоимость, которая часто делает применение описанных технологий экономически необоснованным.

В настоящей работе продемонстрированы возможности повышения физико-механических и эксплуатационных характеристик кавитационно- и абразивностойких покрытий, полученных из традиционных никелевых и никель-хромовых материалов, которые позволяют исключить процедуру оплавления за счет применения современного плазменного напылительного оборудования.

## 1. Напылительное оборудование и материалы

### 1.1. Плазмотрон «ПНК-50»

В работе использовался напылительный плазмотрон «ПНК-50» (рис. 1а), принадлежащий ИТПМ СО РАН, с номинальной и максимальной мощностями 50 и 100 кВт соответственно. Плазмотрон выполнен по линейной схеме с секционированной межэлектродной вставкой (МЭВ) [7, 8], которая обеспечивает следующие преимущества по сравнению с плазмотронами с самоустанавливающейся длиной дуги (ПП-25, Metco F4, 3MB, Praxair SG100 и др.):

- высокое напряжение дуги (100÷450 В), отсутствие его пульсаций в диапазоне 1–10 кГц;
- низкий ток дуги — 80–250 А, и как следствие, низкая эрозия электродов;
- плазмообразующий газ — воздух;
- осесимметричная инжекция порошка с использованием узла кольцевого ввода [9].

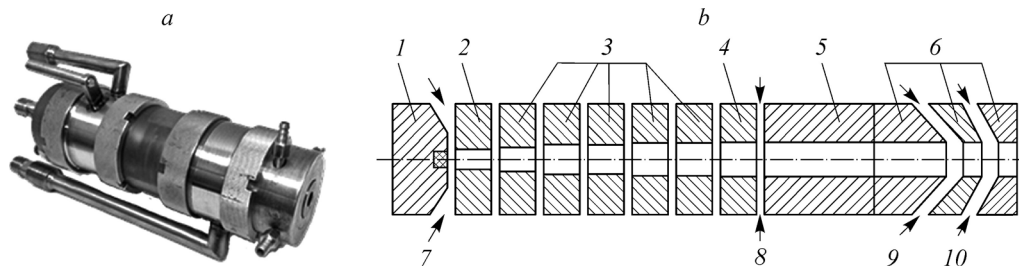


Рис. 1. Схема плазматрона «ПНК-50».

1 — катод, 2 — пусковая секция, 3 — секции межэлектродной вставки, 4 — переходная секция, 5 — анод, 6 — узел кольцевого ввода порошка с газодинамической фокусировкой, 7 — плазмообразующий газ, 8 — защитный газ (завеса анода), 9 — порошок с транспортирующим газом, 10 — фокусирующий газ.

Газоразрядная камера плазматрона представляет собой расширяющийся от катода к аноду канал, набранный из электрически изолированных друг от друга и от электродов секций межэлектродной вставки (МЭВ) (рис. 1b). Межэлектродная вставка позволяет не только фиксировать длину дугового разряда в канале плазматрона, но и менять длину дуги, а соответственно и рабочее напряжение за счет варьирования количества секций МЭВ.

Подача плазмообразующего газа в катодную область производится с закруткой (тангенциально), достаточной для стабилизации только катодного пятна дуги. Защитный газ подается в зазор между последней секцией МЭВ и анодом также тангенциально через кольцо закрутки. В качестве защитного газа используется воздух с добавкой 2–4 % пропан-бутана или метана. Тангенциальная подача защитного газа способствует его течению преимущественно в пристеночной области анода. Помимо защиты материала анода от интенсивного окисления процесс горения пропан-бутана или метана существенно повышает температуру в пограничном слое анода. Вследствие этого наблюдается равномерное распределение тока дугового разряда по большой площади анода (квазидиффузная привязка), т.е. устраняется локальная контрагированная «привязка» анодного пятна к отдельным участкам поверхности. Это обеспечивает не только минимальный уровень эрозии материала анода, но и способствует формированию равномерных профилей скорости и температуры потока плазмы на выходном срезе анода.

В качестве плазмообразующего, транспортирующего и фокусирующего газов используется обычный воздух (так же могут использоваться любые технически чистые газы). Плазматрон рассчитан на работу в ламинарном, турбулентном и сверхзвуковом режимах истечения плазменных струй [10], что позволяет с высокой эффективностью напылять покрытия из любых материалов (металлических, керамических, композиционных и т.д.).

## 1.2. Материалы и режим нанесения покрытий

На основе анализа условий работы гребных винтов речных теплоходов и литературных данных по материалам покрытий, применяемых для защиты от коррозионного, гидроабразивного и кавитационного износов, были выбраны порошковые материалы для защиты лопастей гребного винта водомётного движителя теплохода «КС-101Д», а также для изготовления образцов покрытий для лабораторных исследований. На каждую лопасть гребного винта (рис. 2) методом воздушно-плазменного напыления были нанесены защитные покрытия толщиной 300 мкм из порошков следующих сплавов: лопасть № 1 — покрытие из самофлюсующегося сплава системы Ni-Cr-B-Si-C; лопасть № 2 — интерметаллидное Ni-Ti покрытие; лопасть № 3 — бронзовое покрытие типа БрАЖНМц; лопасть № 4 — интерметаллидное Ni-Al покрытие. В табл. 1 представлены данные об основных характеристиках использованных порошковых материалов.

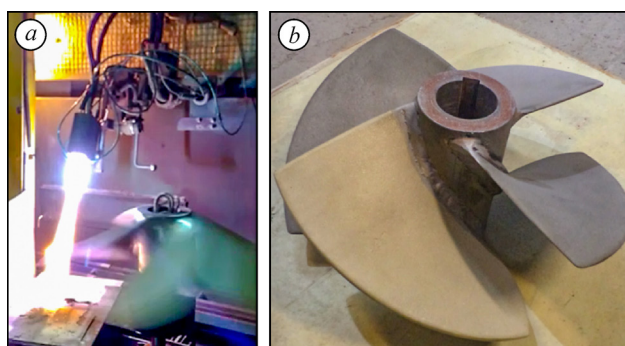


Рис. 2. Гребной винт водометного движителя с защитными покрытиями.

*a* — процесс напыления, *b* — винт с нанесенными покрытиями.

Таблица 1

Характеристики порошковых материалов для напыления

Покрытие	Порошковый материал	Хим. состав, вес. %	Фракция порошка, мкм	Микротвердость порошка, HV
Ni/Cr	HX16CP3	Ni-основа + Cr 16 %, Si 3,2 %, B 2,7 %, C 0,75 %	40–100	370–410
Ni/Ti	H55T45	Ni-основа + Ti 45 %	40–100	300–350
Cu/Al	БрАЖНМц	Cu-основа + Al 8,5 % Fe 4 %, Ni 5 %, Mn 1,5 %	40–100	110–130
Ni/Al	H85Ю15	Ni-основа + Al 15 %	40–100	340–350

Нанесение покрытий всех видов выполнялось в одинаковых условиях (табл. 2) с использованием ранее отработанного режима напыления [11]. Перед нанесением покрытий поверхность изделия подвергалась пескоструйной обработке. Отпуск внутренних напряжений, возникающих в покрытиях после напыления, не производился.

Известно, что качество покрытий определяется, в первую очередь, двумя основными характеристиками конденсированной фазы напылительной струи: скоростью и температурой частиц наносимого материала [12–15]. Диагностика дисперсной фазы в процессе нанесения покрытий позволила определить диапазон режимных параметров воздушно-плазменного напыления порошковых материалов.

Исследования пространственной структуры плазменной струи, а также измерения скорости и температуры дисперсной фазы в процессе напыления проводились с помощью оригинальной оптической системы экспресс-контроля, построенной на базе цифровой камеры и спектрометра видимого диапазона длин волн [16–18]. Диагностическая система включала цифровую видеокамеру с установленным узкополосным светофильтром (яркостный канал), регистрирующую треки излучающих частиц материала, и фотоспектрометр оптического диапазона, регистрирующий суммарный спектр двухфазной струи.

Таблица 2

Режим плазменного напыления покрытий

Диаметр сопла	8 мм
Расход плазмообразующего газа (воздух)	5,25 г/с (260 норм. литров/мин)
Ток дуги	180 А
Напряжение дуги	250 В
Дистанция напыления	170 мм
Скорость напыляемых частиц*	271 ± 45 м/с
Температура напыляемых частиц*	2350 ± 127 К

\*Измерения проведены при напылении порошков Ni/Cr крупностью 40÷100 мкм.

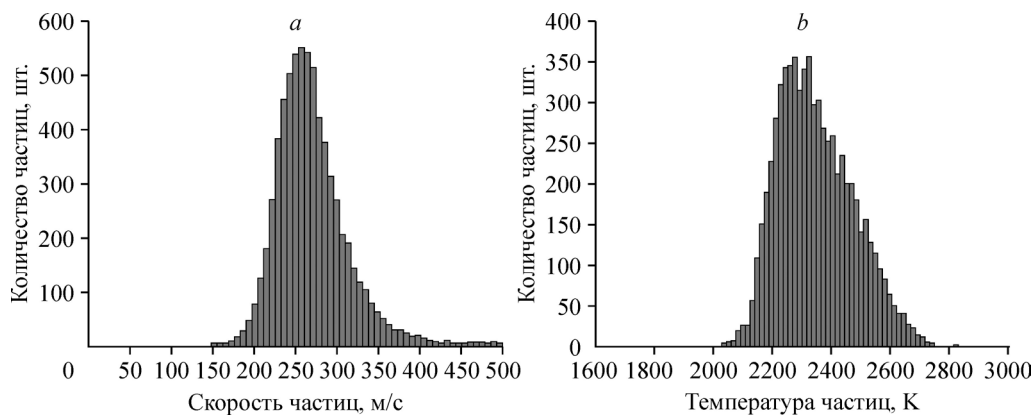


Рис. 3. Зависимости средних по сечению напылительной струи скорости (а) и температуры (б) частиц конденсированной фазы Н85Ю15 размером 40–100 мкм на дистанции напыления 170 мм. Средние значения 271 м/с (а) и 2350 К (б); стандартное отклонение 45 м/с (а) и 127 К (б).

Измерения скорости частиц производились время-пролетным методом, а температуры — с помощью подхода спектрально-яркостной пирометрии (СЯП) [19, 20]. Погрешность измерения скорости индивидуальных частиц составляла  $\pm 1\%$ . Методическая погрешность измерения температуры частиц, связанная со спектральной зависимостью излучательной способности материала, составляла для условий экспериментов  $+60 \div +100$  К, случайная погрешность измерений —  $\pm 2\%$ . В качестве примера на рис. 3 представлены распределения по сечению струи средних значений температуры и скорости частиц порошка из Ni-Al сплава на дистанции напыления 170 мм [8]. Как уже было отмечено выше, анализ работы напылительной установки позволил установить связь «рабочий режим–параметры конденсированной фазы», что обеспечило выбор режимов напыления вышеуказанных порошковых материалов.

Предварительные исследования структуры напыленных покрытий на образцах позволили определить одни из их основных характеристик — пористость и микротвердость, значения которых представлены в табл. 3. Видно, что пористость нанесенных покрытий практически одинакова, в то время как значения микротвердости имеют существенные отличия, что определяется уже характеристиками материалов используемых порошков.

### 1.3. Натурные и стендовые испытания напыленных покрытий

Опытный винт с покрытиями и контрольный без покрытий испытывались в течение навигации 2016 года в жестких условиях мелководья рек Бия, Катунь и верхняя Обь, где они подвергались интенсивному коррозионному, кавитационному и гидроабразивному износу. Плазменное напыление покрытий из порошков различных сплавов на всех четырех лопастях гребного винта теплохода «КС-100 Д» дало положительный эффект (рис. 4). Наиболее удачным оказался вариант защитного покрытия из интерметаллидного Ni-Al сплава. Покрытие из самофлюсующегося сплава системы Ni-Cr-B-Si-C также показало хороший результат. Однако в конце навигации произошло отслоение данного покрытия.

Таблица 3  
Характеристики напыленных покрытий

Покрытие	Пористость покрытия, %	Микротвердость, НВ
Ni/Cr	3...4	780...900
Ni/Ti	4...5	550...650
Cu/Al	4...5	200...220
Ni/Al	4...5	620...680

Лопасты гребного винта теплохода «КС-100Д» с плазменно-напыленными покрытиями после навигации на реках Бия, Катунь и Верхняя Обь				Контрольный винт
Покрытие Ni-Cr-B-Si-C	Покрытие Ni-Ti	Покрытие Cu-Al (БрАЖНМц)	Покрытие Ni-Al	
Всасывающая поверхность				
				
Напорная поверхность				
				

Рис. 4. Наружный вид гребных винтов быстроходных маломерных судов проекта «КС-101 Д» после навигации.

Можно ожидать его высокую эффективность при напылении с промежуточным подслоем. Обычно при таких жестких условиях эксплуатации (эксплуатация при высоких оборотах в мелководных областях) к концу навигации гребной винт теплохода вышеуказанного типа приходит в полную негодность. В частности, контрольный гребной винт (без защитных покрытий) потребовал его текущего ремонта во время навигации (приварка пластин к изношенным кромкам, а так же наплавка изношенных поверхностей). Гребной винт с износостойкими покрытиями внешне выглядел практически не изношенным и оказался пригоден к эксплуатации в следующий навигационный период.

На рис. 5 представлены фотографии лопастей гребных винтов после навигации с покрытием из Ni-Al сплава, где средняя остаточная толщина края лопасти составила 6,0–6,5 мм при толщине нанесенного покрытия 300 мкм (рис. 5а), и отремонтированной лопасти винта без покрытия, где средняя остаточная толщина края которой составила 3,5–4,0 мм (рис. 5б). На основании эксплуатационных испытаний был сделан вывод о целесообразности использования плазменнонапыленных покрытий для защиты гребных винтов от коррозионного, гидроабразивного и кавитационного износов [21, 22]. Можно ожидать эффективности технологии плазменного напыления и при других видах изнашивания поверхности судовых деталей.

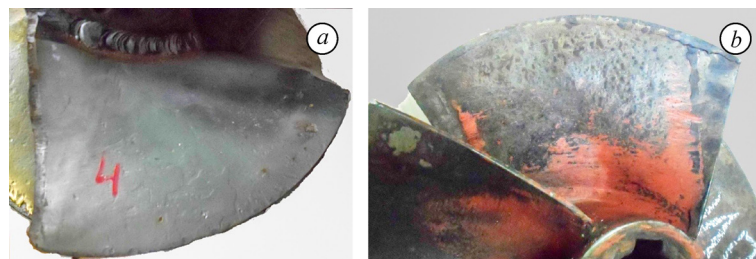


Рис. 5. Лопасты гребных винтов теплоходов проекта «КС-101Д» после навигации 2016 года.

*a* — лопасть с защитным Ni-Al покрытием,  
*b* — отремонтированная во время навигации лопасть без покрытия.

Испытания износостойкости упрочненных изделий в условиях эксплуатации дают наиболее достоверные результаты и основания для рекомендации внедрения технологии упрочнения в практику. Однако такие испытания требуют сложных организационных мероприятий, значительных затрат на оборудование и большого труда квалифицированного технического персонала для выпуска экспериментального изделия. Поэтому целесообразно предварительно изготавливать экспериментальных деталей и их эксплуатационные испытания лабораторными исследованиями на стендах в условиях, возможно полно воспроизводящих рабочие режим и диапазон нагружения.

Гидроабразивное изнашивание вызывается воздействием твердых частиц, увлекаемых потоком жидкости. Возникает такое поверхностное усталостное изнашивание под действием больших удельных импульсных нагрузок, превышающих предел текучести металла, в результате чего образуются микропластические деформации сжатия поверхностных слоев. Микро- и макротрещины, образующиеся по мере работы, развиваются и приводят к усталостному отслаиванию частиц металла. На контактных поверхностях образуются одиночные и групповые осповидные углубления и впадины — питтинги. Глубина впадин зависит от свойств металла, удельных давлений и размера контактных поверхностей. После заметного проявления усталостного износа быстро наступает аварийное состояние.

Кроме гребных винтов контактной усталости подвержены многие детали механизмов, где поверхностные напряжения высоки благодаря сосредоточенным нагрузкам, циклически меняющимся в течение нормального режима эксплуатации [2, 23]. Большую роль в снижении долговечности деталей различных механизмов играют концентраторы напряжений. К поверхностным концентраторам напряжений, которые способствуют разрушению, относятся поверхностные поры, трещины, образовавшиеся при шлифовании, глубокие риски, царапины. На контактную выносливость влияют механические свойства материалов деталей — твердость, предел прочности; величина, знак и распределение остаточных напряжений; масштабный фактор и размеры контактной площадки; наличие или отсутствие смазки и т.д. Схемы нагружения при испытаниях на контактную выносливость регламентируют рекомендации [24].

В настоящей работе реализована схема испытаний на пульсирующий контакт. Для сравнительных испытаний были выбраны порошковые сплавы, которые показали большой положительный эффект при упрочнении лопастей гребного винта теплохода «КС-101 Д» с водометным движителем, а именно: № 1 — покрытие из самофлюсующегося сплава системы Ni-Cr-B-Si-C (ПР-Н77Х15С3Р2-3); № 2 — интерметаллидное Ni-Ti покрытие (ПВ-Н55Т45); № 3 — интерметаллидное Ni-Al покрытие (ПВ-Н85Ю15). Покрытия наносили на образцы в виде шайб диаметром 30 мм и толщиной 8 мм. Материалом шайб являлась малоуглеродистая сталь 10 ГОСТ 1050. Нанесение покрытий толщиной 0,5–0,6 мм проводилось методом плазменного напыления с помощью плазмотрона «ПНК-50».

Для воспроизведения жестких условий эксплуатации гребных винтов, работающих при высоких оборотах в мелководных областях, был разработан стенд для повторно-импульсного нагружения поверхности (рис. 6). Стенд представляет собой лабораторный копёр, производящий удары по индентору, находящемуся в постоянном контакте с испытуемым образцом. Масса свободно падающего груза выбиралась в ходе предварительных испытаний и составила  $5 (\pm 0,015)$  кг, высота сбрасывания груза — 0,05 м. При этом энергия импульса нагружения составила 3 Дж.

Лабораторный копёр (рис. 6а) имеет станину 1, отлитую совместно с двумя кронштейнами, через которые пропущен шток 2. На штоке свободно надет груз 3, поднимающийся посредством поворота улитки 4. На нижнем конце штока укреплен боек 5

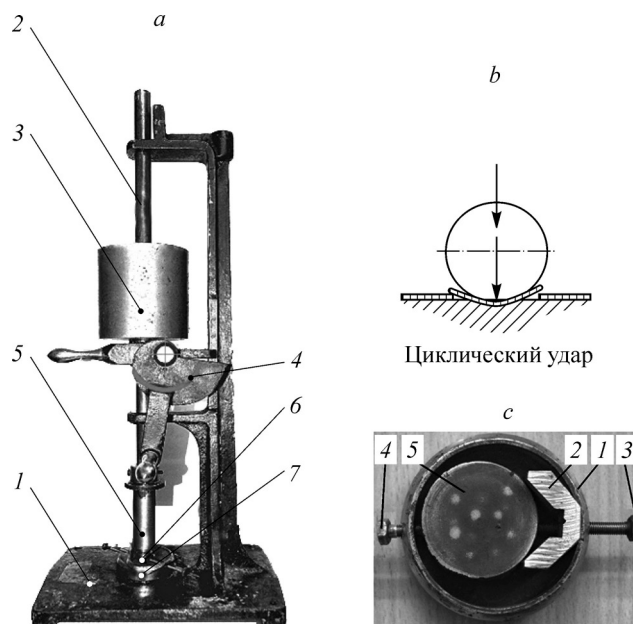


Рис. 6. Лабораторный копёр для испытаний образцов с износостойкими покрытиями на контактную выносливость.

*a* — наружный вид копра: 1 — станина, 2 — шток, 3 — груз, 4 — улитка, 5 — боёк, 6 — сменный индентор, 7 — узел крепления образца; *b* — схема импульсных механических нагрузок; *c* — узел крепления образца: 1 — опора, 2 — призма, 3 — регулировочный винт призмы, 4 — зажимной винт, 5 — образец.

со сменным индентором 6. Индентор бойка представляет собой шарик диаметром 10 мм, изготовленный из твердого сплава. При повороте улитки 4 груз поднимается на высоту 0,05 м, после чего срывается с улитки и свободно падает. Импульс усилия, создаваемый падающим грузом, передается через подъемник с ручкой на боёк. С помощью рукоятки подъемника осуществляется подъем штока с грузом при установке и съеме узла крепления испытуемого образца 7 и при оценке полученных образцом повреждений. Узел крепления образца показан на фото (рис. 6с). Образец 5 с износостойким покрытием при проведении испытаний устанавливается на опору, которая, в свою очередь, укрепляется на платформе копра цилиндрическим установочным хвостовиком. В плане положение образца задается регулированием установочного винта 3 опорной призмы 2 и фиксируется зажимным винтом 4.

В качестве меры оценки повреждений поверхности, упрочненной износостойким покрытием, выбран диаметр лунки, создаваемой индентором. Размер лунки измерялся с помощью лупы Бринелля. Моментом разрушения покрытия считалось появление в нем трещин и отслоения. Вид повреждений, которые получили образцы после испытаний, оказался идентичен повреждениям лопастей гребных винтов, полученных в течение навигации (рис. 7).

При возникновении трещин и отслоения покрытий испытания прекращались. По результатам испытаний построены графики зависимости величины диаметра пятна контакта (мм) от числа циклов нагружения  $N$  (рис. 8). Из анализа экспериментальных данных следует, что покрытие, напыленное порошком Ni-Al сплава, обеспечивает наиболее надежную защиту по сравнению с другими исследованными материалами (рис. 9).



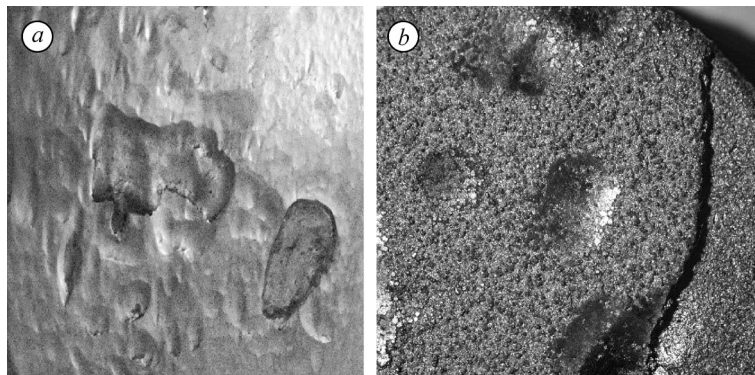
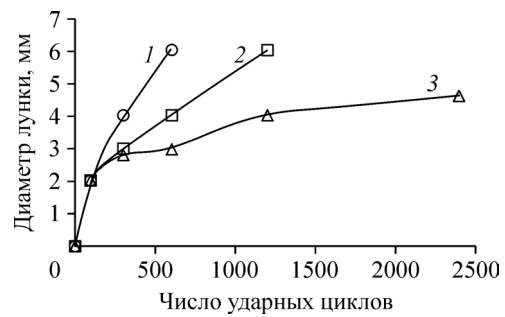


Рис. 7. Вид поверхности с износостойким покрытием Ni-Cr-B-Si-C.  
*a* — лопасть после навигации, *b* — образец после многократного  
 контактно-импульсного воздействия на лабораторном стенде.

Рис. 8. Стойкость плазменнонапыленных покрытий к контактно-импульсному воздействию.

1 — Ni/Ti, 2 — Ni/Cr, 3 — Ni/Al.



Примечательно, что после разрушения напыленного слоя Ni-Al сплава на основном материале не остается заметных следов повреждений.

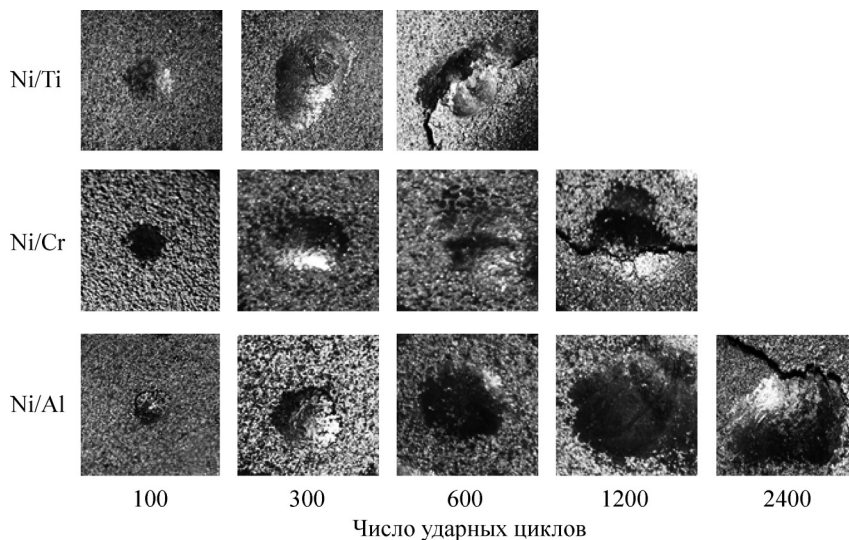


Рис. 9. Вид деформации покрытий (диаметр пятна контакта с индентором) в зависимости от числа ударных циклов.

### Выводы

В ходе проведенных исследований установлено следующее.

1. Результаты натурных и стендовых испытаний показали целесообразность использования плазменнонапыленных покрытий на лопастях гребных винтов для защиты последних от коррозионного, гидроабразивного и кавитационного износа.

2. Разработанная методика стендовых испытаний при контактноимпульсном нагружении износостойкого покрытия хорошо имитирует условия работы лопастей скоростного высокооборотного гребного винта на мелководье.

3. Результаты испытаний износостойких покрытий на лабораторном копре совпадают с данными эксплуатационных испытаний лопастей гребного винта теплохода «КС-101 Д», проведенных в навигацию 2016 года на реках Бия, Катунь и Верхняя Обь.

4. Наиболее стойким к контактно-импульсному воздействию при лабораторных исследованиях, как и при эксплуатационных испытаниях, оказался вариант защитного покрытия сплавом Ni-Al.

### Список литературы

1. Пирсол И. Кавитация. М.: Мир, 1975. 95 с.
2. Токарев А.О., Ивачик С.Н., Ивачик И.С. Анализ причин и профилактика аварий деталей судовой техники. Новосибирск: Изд-во НГАВТ, 2010. 250 с.
3. Арабян Л.К., Бекетов А.И., Голубев Н.Ф., Гельтман Н.М. Плазменное упрочнение гребных винтов // Речной транспорт. 1983. № 1. С. 33–35.
4. Арабян Л.К., Засыпкин И.М., Кузьмин В.И., Токарев А.О. Структура малоуглеродистой стали с износостойким покрытием после термообработки ламинарной струей азотной плазмы // Изв. СО АН СССР. Серия технических наук. 1990. Вып. 2. С. 99–104.
5. Kumar R.K., Kamaraj M., Seetharamu S., Pramod T., Sampathkumaran P. Effect of spray particle velocity on cavitation erosion resistance characteristics of HVOF and HVOF processed 86WC-10Co4Cr hydro turbine coatings // J. Thermal Spray Technology. 2016. Vol. 25, No. 6. P. 1217–1230.
6. Wang Q., Tang Z., Cha L. Cavitation and sand slurry erosion resistances of WC-10Co-4Cr coatings // J. Materials Engng and Performance. 2015. Vol. 24, No. 6. P. 2435–2443.
7. Тарасенко Ю.П., Царева И.Н., Бердник О.Б., Фель Я.А., Кузьмин В.И., Михальченко А.А., Картаев Е.В. Структура и физико-механические свойства жаростойкого интерметаллического покрытия «Ni-Co-Cr-Al-Y», полученного на модернизированном плазменном оборудовании // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 5. С. 671–680.
8. Долматов А.В., Гуляев И.П., Кузьмин В.И., Лысков Е.А., Ермаков К.А. Анализ и оптимизация газотермического напыления по скорости и температуре конденсированной фазы потока // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24, № 1. С. 83–94.
9. Kuzmin V.I., Mikhail'chenko A.A., Kovalev O.V., Kartaev E.V., Rudenskaya N.A. The technique of formation of the axisymmetric heterogeneous flow for thermal spraying of powder materials // J. Thermal Spray Technology. 2012. Vol. 21. P. 159–168.
10. Гуляев И.П., Кузьмин В.И., Голубев М.П., Тырышкин П.А., Долматов А.В. Визуализация газодинамической структуры плазменных потоков напылительного плазматрона «ПНК-50» теньевым методом // Вест. Югорского гос. ун-та. 2018. № 4(51). С. 61–68.
11. Корниенко Е.Е., Муль Д.О., Рубцова О.А., Ващенко С.П., Кузьмин В.И., Гуляев И.П., Сергачев Д.В. Влияние режимов плазменного напыления на структуру и свойства покрытий из Ni3Al // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23, № 6. С. 957–966.
12. Тушинский Л.И., Плохов А.В. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий // Новосибирск: Наука, 1986. 197 с.
13. Балдаев Л.Х., Димитриенко Л.Н. Проблема качества газотермических покрытий // Надежность и сертификация оборудования для нефти и газа. 2001. № 3. С. 18–20.
14. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления: учеб. пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомпозигов». М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 360 с.
15. Анисимов М.И., Бланк Е.Д., Галеев И.М., Орыщенко А.С. Влияние скорости и температуры металлизационного потока на свойства детонационных покрытий // Труды 6-й Междун. научно-техн. конф. «Пленки и покрытия». СПб: Изд-во СПбГТУ, 2001. С. 462–464.
16. Dolmatov A.V., Gulyaev I.P., Gulyaev P.Yu., Jordan V.I. Control of dispersed-phase temperature in plasma flows by the spectral-brightness pyrometry method // IOP Conference Series: Materials Sci. and Engng. 2016. Vol. 110. P. 012058-1–012058-6.
17. Ермаков К.А., Долматов А.В., Гуляев И.П. Система оптического контроля скорости и температуры частиц в технологиях газотермического напыления // Вест. Югорского гос. ун-та. 2014. Т. 2, № 33. С. 56–68.
18. Долматов А.В., Гуляев И.П., Лысков Е.А., Москаленко В.О. Автоматизация теплофизических исследований процесса газотермического напыления покрытий // Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов. 2016. № 6. С. 192–201.
19. Заявка на изобретение РФ № 2015123313, МПК<sup>51</sup>G01J5/50. Способ спектрально-яркостной пирометрии объектов с неоднородной температурой поверхности / Гуляев И.П., Долматов А.В., Гуляев П.Ю., Боро-

- ненко М.П.; заявители: Гуляев И.П., Долматов А.В.; заявл. 17.06.2015; опубл. 10.01.2017, Бюлл. № 1; приоритет от 17.06.2015.
20. **Вашенко С.П., Гуляев И.П., Гуляев П.Ю., Долматов А.В., Кузьмин В.И.** Экспресс-контроль движения и нагрева частиц в газотермическом напылении // Сборник докл. 17 Междун. научно-практической конференции «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика», Санкт-Петербург, 14–17 апреля 2015. С. 61–68.
  21. **Кузьмин В.И., Токарев А.О., Титов С.В., Федотова Е.С., Павлушкин С.В.** Плазменное напыление покрытия на лопасти гребных винтов речных судов для защиты от кавитационного и гидроабразивного износа // Речной транспорт (XXI век). 2017. № 1 (81). С. 58–60.
  22. **Токарев А.О., Кузьмин В.И., Федотова Е.С., Малыгина Я.К., Сохранич А.И.** Защита от кавитационного и гидроабразивного изнашивания поверхности плазменно-напыленными покрытиями // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2017. № 1–2. С. 118–125.
  23. **Мироненко И.Г., Токарев А.О.** Анализ причин повреждения судовых технических средств. Новосибирск: Изд-во ФГБОУ ВО «СГУВТ», 2017. 224 с.
  24. **Р-50-54-30-87.** Расчеты и испытания на прочность. Методы испытаний на контактную усталость. М.: ВНИИМАШ, 1987. 43 с.

*Статья поступила в редакцию 7 августа 2019 г.,  
после доработки — 28 октября 2019 г.,  
принята к публикации 6 ноября 2019 г.*