

## СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1234-1241

### INVESTIGATION OF BEHAVIOUR OF COVERS ON STAINLESS MATERIALS IN CONDITIONS OF HIGH CONTACT LOADS

**V.V. Veselkov<sup>1</sup>, N.V.Lobanov<sup>2</sup>, A.V.Vasilev<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> — Branch of Federal State Educational of Higher Education “Northern (Arctic) Federal  
University named after M.V. Lomonosov”, Severodvinsk, Russian Federation

*As experience indicated, a specificity of stainless steels, which allowed using in the shipbuilding field, is scoring and seizing on contact and thread surfaces during assembling with low tightening load 0.1 of yield stress instead required min 0.5. The cause leads to non-stabilized tightening of blade-hub joint or insufficient tightening. In this article the task of experimental investigation of behavior of metal covers for stainless steel pairs, which working with high contact loads, was defined. The goal of the investigation - detect the extreme practice tightening load without scoring and seizing during assembling of propeller joints. The test subject is covers of various materials coated on stainless base and a stability of shear of contacting surfaces was researched, because it's proposed that coated material works as a hard-plastic greasing. Boundary magnitudes of loads leading to seizing of stainless steels were discovered, covers and coating methods excluded seizing and working with high contact loads were defined, friction coefficients of covers coated on stainless steel with cool gas-dynamic spatter method were detected. It was established, that most allowable cover for excluding scoring and seizing on contact surfaces of fixed elements of assembling propellers is aluminum cover coated with cool gas-dynamic spatter method, the maximum load on contact surface for the Al-cover is 380 MPa, the magnitude correspond to tightening with 0.55 of material yield stress. It's confirmed, that copper cover may be used also instead aluminum.*

*Keywords: stainless steels, scoring and seizing, metal covers, cool gas-dynamic spatter method.*

#### For citation:

Veselkov, Vyacheslav V., Nikolai V. Lobanov, and Andrey V. Vasilev. “Investigation of behaviour of covers on stainless materials in conditions of high contact loads.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.6 (2017): 1234–1241. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1234-1241.

УДК 621.7-4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА НЕРЖАВЕЮЩИХ МАТЕРИАЛАХ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ КОНТАКТНЫХ НАГРУЗОК

**В. В. Веселков<sup>1</sup>, Н. В. Лобанов<sup>2</sup>, А. В. Васильев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> — Филиал ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет  
Имени М. В. Ломоносова», Северодвинск, Российская Федерация

*Как показывает практика, особенностью нержавеющей сталей, допущенных к применению в судовой отрасли, является закусывание и схватывание на контактных и резьбовых поверхностях при сборке даже при невысоких усилиях затяжки 0,1 предела текучести материала при требуемых не менее 0,5 предела текучести, что ведет к нестабильности затяжки соединения лопасть – ступица или недостаточной затяжке. В данной работе поставлена задача экспериментального исследования поведения металлических покрытий для пар трения из нержавеющей высокопрочных сталей, работающих при высоких контактных давлениях. Целью работы является выявление предельных практических усилий затяжки без угрозы появления задиров и схватывания при сборке соединений гребных винтов. Объектом экспериментальных исследований являлось изучение покрытий металлов, нанесенных на нержавеющую основу, и стабильность*

сдвига контактирующих поверхностей, исходя из предположения о том, что покрывающий металл «работает» как твердо-пластичная смазка. Определены граничные величины усилий, при которых происходит закусывание нержавеющей материалов, определены покрытия и метод нанесения, исключая закусывание при высоких контактных давлениях, определены коэффициенты трения покрытий, нанесенных методом холодного газодинамического напыления на нержавеющую основу. Установлено, что наиболее приемлемым покрытием для исключения явлений задиров и схватывания на контактных поверхностях элементов крепления гребных винтов является покрытие алюминием, нанесенное холодным газодинамическим методом. Максимальная нагрузка на контактную поверхность для данного покрытия составила 380 МПа, что соответствует затяжке 0,55 от предела текучести материала. Подтверждено, что кроме алюминиевого покрытия допускается использование покрытия медью.

*Ключевые слова:* нержавеющие стали, закусывание и схватывание, металлические покрытия, метод холодного газодинамического напыления.

**Для цитирования:**

Веселков В. В. Исследование поведения покрытий на нержавеющих материалах в условиях высоких контактных нагрузок / В. В. Веселков, Н. В. Лобанов, А. В. Васильев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1234–1241. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1234-1241.

**Введение**

Фланцевые соединения лопасти и ступицы гребных винтов [1] крепятся болтами из высокопрочных нержавеющей сталей с целью противостоять тяжелым условиям циклическо-ударного нагружения. Как показывает практика, особенностью нержавеющей сталей, допущенных к применению в судовой отрасли (для лопасти и ступицы — марок 08X14НДЛ ( $\sigma_T/\sigma_B = 500/650$  МПа) или 06X15Н4ДМЛ ( $\sigma_T/\sigma_B = 620/790$  МПа), для фиксирующих деталей — марок 14X17Н2 ( $\sigma_T/\sigma_B = 540/687$ ) или 07X16Н4Б ( $\sigma_T/\sigma_B = 690/834$  МПа)), является закусывание и схватывание на контактных и резьбовых поверхностях при сборке даже при невысоких усилиях затяжки 0,1 предела текучести материала при требуемых не менее 0,5  $\sigma_T$  [2], что ведет к нестабильности затяжки соединения *лопасть – ступица* или недостаточной затяжке.

Под нестабильностью затяжки в данной работе понимается прерывание процесса затяжки из-за заедания и закусывания на контактных поверхностях деталей крепления.

Анализ возникновения отказов при сборке выявил следующие причины:

1. Недостаточная точность изготовления крупногабаритных крепежных элементов, ведущая к перекосу осей скрепляемых деталей [3], [4] из-за особенностей технологии изготовления гребных винтов (рис. 1 и 2).

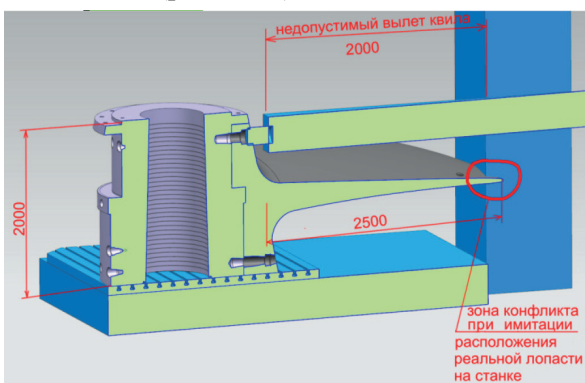


Рис. 1. Совместное растачивание отверстий

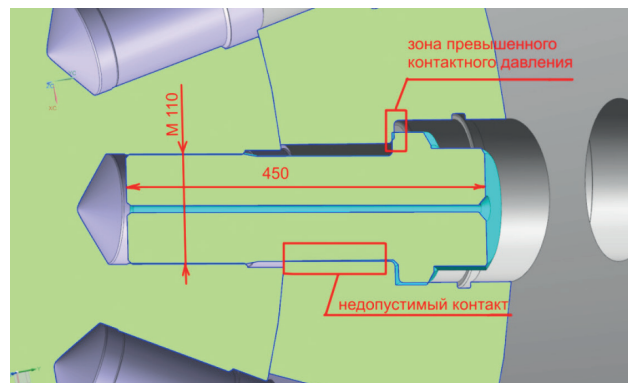


Рис. 2. Зона недопустимых контактов из-за перекоса осей деталей

2. Особенности поведения покрытий [5] – [7], нанесенных на поверхность нержавеющей материалов.

После апробирования различных способов нанесения покрытий (гальванический, плазменный, газодинамический) выяснилось, что наиболее приемлемым для крепежных элементов греб-

ных винтов является *метод холодного газодинамического напыления* [8], [9] поскольку он исключает термическое и химическое воздействие на крепежный элемент, а также отличается высокой адгезией мягких металлов (Cu, Al, Zn, Pb) к основному материалу — высокопрочной нержавеющей стали.

Для выявления предельных практических усилий затяжки, без угрозы появления задиrow и схватывания при сборке соединений гребных винтов, была поставлена задача экспериментального исследования поведения металлических покрытий для пар трения из нержавеющей высокопрочных сталей, «работающих» при высоких контактных давлениях. Объектом исследований являлись покрытия из различных металлов, нанесенных на нержавеющую основу, при этом изучалась стабильность сдвига контактирующих поверхностей, исходя из предположения о том, что покрывающий металл «работает» как твердо-пластичная смазка [10] – [12]. Исследование проводилось на базе оценки коэффициента трения.

### Методы и материалы

Для исследований влияния физических свойств покрытия на коэффициент трения был применен специально разработанный стенд на основе измерительных тензодатчиков. Было проведено исследование пары нержавеющей сталей 07X16H4Б-Ш (материал болта) и 08X14HДЛ (материал ступицы гребного винта) при изменяемых параметрах (нормальное давление, угол поворота образцов) и состояниях поверхностей для определения усилий, при которых возникали задиры и появлялось схватывание контактных поверхностей, а также определялись оптимальные сочетания материалов металлических покрытий, исключающих закусывание для нержавеющей сталей.

Исследования проводились согласно схеме эксперимента, показанной на рис. 3. В экспериментах использовали подвижный 1 и неподвижный 2 образцы из испытуемых материалов, имеющие плоские кольцевые поверхности. Нормальное давление создавалось силой  $N$ , приложенной к подвижному образцу по оси вращения. Силу  $N$  измеряли S-образным тензодатчиком UU-100 кН.

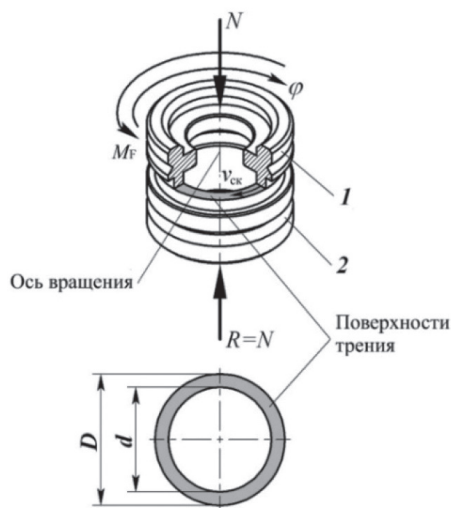


Рис. 3. Схема эксперимента:  
1 — подвижный образец;  
2 — неподвижный образец

Силу трения измеряли при вращении подвижного образца специально спроектированным моментным ключом на основе тензодатчика U2A-кН трения. Первичные сигналы с тензодатчиков одновременно регистрировались тензостанцией ZET017-T8 и записывались в виде графиков как функция от пути трения в SCADA-системе ZETView. Среднее расчетное нормальное давление на поверхностях трения определяли по формуле  $p_N = N/A_F$ .

Коэффициент  $f_F$  трения по всей поверхности принимали постоянным. В этом случае момент силы трения относительно оси вращения определялся по формуле  $M_F = Nf_F D_F$ , откуда  $f_F = M_F/(N D_F)$ , где  $D_F = \frac{2}{3} \left( \frac{D^3 - d^3}{D^2 - d^2} \right)$  — приведенный диаметр сил трения.

Данные из системы ZETView передавались в редактор MSExcel. Получили зависимости расчетного коэффициента трения  $f_F$  и среднего нормального давления.

### Результаты

В экспериментальном исследовании участвовали подвижные образцы из нержавеющей стали (материал болтов) с механическими характеристиками:  $\sigma_{0,2} = 690$  МПа,  $\sigma_b = 840$  МПа, неподвижные образцы из нержавеющей стали (материал ступицы) с механическими характеристиками:  $\sigma_{0,2} = 510$  МПа,  $\sigma_b = 650$  МПа и неподвижные образцы из бронзы (материал ступицы), которые использовались в качестве базы сравнения, так как опыт эксплуатации показал, что меньше всего

отказов по причине «закусывания» возникает при затяжке высоконагруженных резьбовых соединений с болтами из нержавеющей стали и ступицами из бронзы. Использовались пары образцов с покрытием и без и подвижные образцы с покрытием медью (Cu), алюминием (Al) или цинком (Zn), выполненные газодинамическим напылением. Образцы с покрытиями и без испытывались как со смазкой, так и без.

Были реализованы следующие два варианта нагружения.

1-й вариант — при ступенчатом нагружении *A* — повышение давления (имитация реальной затяжки) происходило с шагом 40 МПа (10 ступеней) до расчетных давлений на контактных поверхностях, составляющих для нержавеющей стали — 17 – 240 МПа; для бронзы — 60 – 85 МПа. Путь трения на каждой ступени составлял  $S_F = 12 - 15$  мм, что соответствовало повороту головки болта на угол 17–40°. Было выявлено, что реальный путь трения намного больше расчетного и составил 60 – 70 мм, что соответствовало затягиванию болта M100 × 4 на угол ~100°. Увеличенный путь трения объясняется наличием упругих зазоров между контактными поверхностями.

2-й вариант — при постоянном нагружении *B* — давление (70, 140, 227, 370 МПа) прикладывалось сразу и поддерживалось неизменным на всем пути трения для выяснения влияния силы давления и пути трения на условия появления задиров и схватывания. Было выявлено, что максимальный путь трения, без повышения коэффициента трения и без образования задиров (схватывания), составил 150 – 160 мм, т. е. пол-оборота. Типичные результаты экспериментов приведены на графиках (рис. 4).

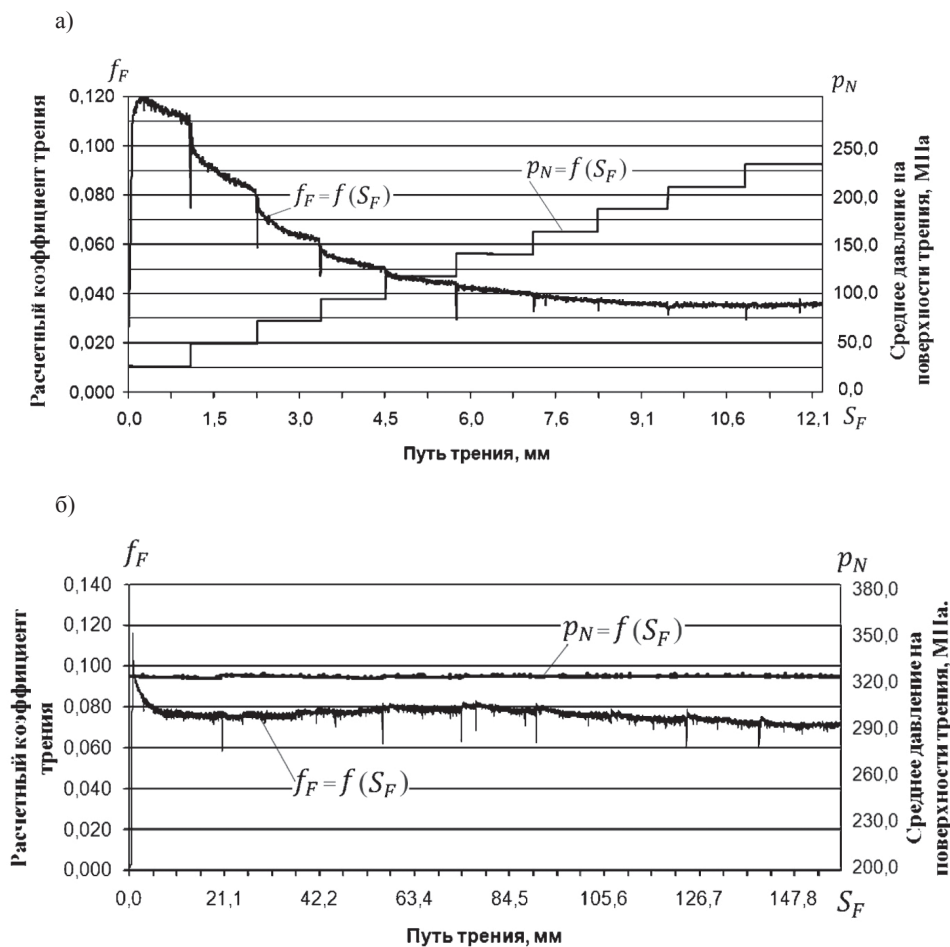


Рис. 4. Графики зависимостей расчетного коэффициента трения, среднего нормального давления на поверхности трения как функции пути трения для пары образцов 08X14НДЛ-07X16Н4Б:

- а — нагружение *A* (ступенчатое), без покрытия поверхности трения, смазка антизадирая OKS245;
- б — нагружение *B* (постоянное), поверхность трения подвижного образца покрыта медью, смазка антизадирая OKS245

Для удобства и наглядности результаты экспериментов сведены в следующую таблицу:

Материалы пары трения	Покры- тие	Смазоч- ный материал	Вид нагру- жения	$p_N$ МПа	$S_F$ мм	$f_F \pm 0,01$ (при страгивании)	$f_F \pm 0,005$ (при скольжении)	Схватыва- ние
07X16H4B-III и БрА9Ж4H4Mц	Нет	Нет	A	<227	<13	0,12 (рывком)	0,100	Нет
			B	<240	<70	0,13 (рывком)	0,100 – 0,120	
				370	<35	0,10 – 0,11 (рывком)	0,200	
	Нет	OKS 245	A	<240	<13	0,10 – 0,11 (плавно)	0,035 – 0,065	Нет
			B	70 – 225	18 – 25	0,10 – 0,11 (плавно)	0,055 – 0,065	
					25 – 70	–	0,065	
		370	18 – 25	0,06 – 0,09 (плавно)	0,032 – 0,050	Нет		
			25 – 70	–	0,050 – 0,070	Нет		
07X16H4B-III и 08X14HДЛ	Нет	Нет	A	> 40	<13	0,12 (рывком)	0,250	Есть
				<270	<13	0,10 – 0,12 (плавно)	0,035 – 0,065	Нет
				270 – 380	8 – 12	0,10 – 0,12 плавно	0,050 – 0,070	Есть
		OKS 245	B	< 225	20 – 25	0,10 – 0,11 (плавно)	0,055 – 0,065	Нет
					25 – 70	–	0,100 – 0,130	
	Cu	Нет	A	<370	<13	0,10 – 0,12 (плавно)	0,080 – 0,110	Нет
				B	25 – 40	0,09 – 0,10 (плавно)	0,090 – 0,100	
					<227	70 – 100	–	
		OKS 245	A	<240	<13	0,12 – 0,13 (плавно)	0,085 – 0,092	Нет
				B	15–45	0,09 – 0,11 (плавно)	0,060 – 0,080	
					<340	45 – 160	–	
	Al	Нет	A	<380	8 – 15	0,10 – 0,12 (плавно)	0,065 – 0,090	Нет
					15 – 23	–	0,090 – 0,120	
					B	12 – 20	0,10 – 0,12 (плавно)	
		<240	20 – 160	–		0,080		
		OKS 245	A	<240	<13	0,12 – 0,13 (плавно)	0,070	Нет
				B	15 – 30	0,10 – 0,11	0,060 – 0,085	
<380	30 – 150				–	0,085		
Zn	Нет	A	< 240	10 – 12	0,08 – 0,09 (плавно)	0,070 – 0,080	Нет	
				12 – 30	–	0,120 – 0,140		
				3 – 5	0,10 – 0,13 (плавно)	0,080 – 0,110		
				5 – 18	–	0,200 – 0,230		
	OKS 245	A	<13	0,01 – 0,11 (плавно)	0,070	Нет		



### Обсуждение

По итогам экспериментального исследования установлена следующая взаимосвязь между стабильностью процесса затяжки и состоянием поверхностного слоя.

1. Чем выше создаваемое давление на поверхности резьбы, тем меньший оборот можно сделать при пониженном и стабильном коэффициенте трения.

2. В паре трения сталь по стали без покрытия и смазки схватывание возникает уже при давлении, превышающем 40 МПа, что намного меньше расчетного (170 – 240 МПа) и имеет место на коротком пути трения (поворот болта на 15°), меньшем расчетного в 3 раза. Это подтверждает склонность пары нержавеющей материалов к «схватыванию» и здесь следует отметить возможную существенную «недотяжку» болта до появления момента «схватывания».

3. В паре трения *сталь – бронза* без смазывания и при максимальном давлении 380 МПа схватывание не наблюдалось, хотя в данном случае был существенно превышен предел текучести бронзы (245 МПа).

4. В парах трения *сталь – сталь* с покрытиями Cu и Al со смазыванием и без «схватывания» не наблюдалось. Работа этой пары образцов соответствовала работе пары *сталь – бронза*. При этом покрытие Al имеет меньший коэффициент трения, чем покрытие Cu. Покрытие Cu в реальной паре трения не исключает схватывание. Следовательно, давление в реальных соединениях значительно выше, чем в экспериментальных образцах.

5. Покрытие Zn не исключает схватывания.

6. Резкое страгивание (рывком) наблюдалось только для образцов без покрытий и смазочного материала. Для остальных вариантов коэффициент трения после страгивания плавно снижался до указанного в таблице значения на указанном пути трения и стабилизировался, после чего начинал увеличиваться.

7. Применение смазочного материала [8] снижает коэффициент трения и увеличивает поворот болта в 1,5 – 3 раза, однако момент затяжки реальных болтов не уменьшается.

### Заключение

По результатам экспериментального исследования было установлено, что наиболее приемлемым покрытием для исключения явлений задиоров и схватывания на контактных поверхностях элементов крепления гребных винтов является покрытие алюминием, нанесенное холодным газодинамическим методом. Определена максимальная нагрузка на контактную поверхность для данного покрытия — 380 МПа, что соответствует затяжке 0,55 от предела текучести материала. Допускается использование покрытия медью. Определены коэффициенты трения для покрытий, полученных методом холодного газодинамического напыления.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кацман Ф. М. Конструирование винто-рулевых комплексов морских судов / Ф. М. Кацман, Г. М. Кудреватый. — Л.: Судостроение, 1974. — 376 с.
2. Биргер И. А. Резьбовые и фланцевые соединения / И. А. Биргер, Г. Б. Иосилевич. — М.: Машиностроение, 1990. — 368 с.
3. Некрасов А. Я. Схемы контактного нагружения витков винтовых соединений / А. Я. Некрасов, М. О. Арбузов // Вестник МГТУ «Станкин». — 2013. — № 4 (27). — С. 36–41.
4. Муркин С. В. Экспериментально-теоретическое исследование положения оси перекоса резьбового соединения, нагруженного опрокидывающим моментом / С. В. Муркин, А. С. Иванов, М. М. Ермолаев [и др.] // Вестник машиностроения. — 2015. — № 10. — С. 31–34.
5. ГОСТ 9.303-84. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования к выбору и обозначения. — М.: Изд-во стандартов, 1984. — 75 с.
6. Горячева И. Г. Механика фрикционного взаимодействия: монография / И. Г. Горячева. — М.: Наука, 2001. — 478 с.

7. Шустер Л. Ш. Влияние свойств материала деталей трибосопряжений на их изнашивание / Л. Ш. Шустер, Р. Р. Камалетдинова // Вестник машиностроения. — 2016. — № 7. — С. 50–52.
8. Архипов В.Е. Обработка стали твердыми частицами с использованием газодинамических установок / В. Е. Архипов, А. Ф. Лондарский, А. Ф. Мельшанов [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2013. — № 9 (105). — С. 7–12.
9. Архипов В. Е. Технологические особенности газодинамического напыления покрытий / В. Е. Архипов, А. Ф. Лондарский, А. Ф. Мельшанов [и др.] // Вестник машиностроения. — 2015. — № 9. — С. 64–69.
10. Зернин М. В. Моделирование контактного взаимодействия с использованием положений механики «контактной псевдосреды» / М. В. Зернин, А. П. Бабин, А. В. Мишин, В. Ю. Бурак // Вестник Брянского государственного технического университета. — 2007. — № 4. — С. 62–72.
11. Матвеевский Р. М. Смазочные материалы. Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний / Р. М. Матвеевский, В. Л. Лашхи, И. А. Буяновский [и др.]. — М.: Машиностроение, 1989. — 224 с.
12. Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей машин: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. Н. Б. Демкина. — Тверь: ТГТУ, 2006. — 232 с.

## REFERENCES

1. Katsman, F. M., and G. M. Kudrevaty. *Konstruirovaniye vinto-rulevykh kompleksov morskikh sudov*. L.: Sudostroenie, 1974.
2. Birger, I. A., and G. B. Iosilevich. *Rez'bovye i flantsevyye soedineniya*. M.: Mashinostroenie, 1990.
3. Nekrasov, Aleksey Yakovlevich, and Mihail Olegovich Arbuzov. "Contact load schemes of threads of coupler-screw and check-screw joints." *Vestnik of MSTU "Stankin"* 4(27) (2013): 36–41.
4. Murkin, S. V., A. S. Ivanov, M. M. Ermolaev, S. K. Rudnev, and M. S. Kuts. "Experimental and theoretical research of skew axis position of threaded joint loaded by tilting moment." *Russian Engineering Research* 10 (2015): 31–34.
5. Russian Federation. State Standard GOST 9.303-84. Pokrytiya metallicheskie i nemetallicheskie neorganicheskie. Obshchie trebovaniya k vyboru i oboznacheniya. M.: Izdatel'stvo standartov, 1984.
6. Goryacheva, I. G. *Mekhanika friktsionnogo vzaimodeistviya: monografiya*. M.: Nauka, 2001.
7. Shuster, L. Sh., and R. R. Kamaletdinova. "Influence of material properties of tribocoupling parts on their wear." *Russian Engineering Research* 7 (2016): 50–52.
8. Arkhipov, V. E., A. F. Londarsky, A. F. Melsharov, G. V. Moskvitin, and M.S. Pugachev. "Processing steel hardness particles with use of gasdynamic installations." *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* 9(105) (2013): 7–12.
9. Arkhipov, V. E., A. F. Londarskiy, A. F. Mel'shanov, G. V. Moskvitin, M. S. Pugachev, and N. S. Falaleev. "Technological features of gas-dynamic spraying of coatings." *Russian Engineering Research* 9 (2015): 64–69.
10. Zernin, M. V., A. P. Babin, A. V. Mishin, and V. Yu. Burak. "Modelirovaniye kontaktnogo vzaimodeistviya s ispol'zovaniem polozhenii mekhaniki «kontaktnoi psevdosredy»." *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 4 (2007): 62–72.
11. Matveevskii, R. M., V. L. Lashkhi, I. A. Buyanovskii, et al. *Smazochnye materialy. Antifriktsionnye i protivoznosnye svoystva. Metody ispytaniy*. M.: Mashinostroenie, 1989.
12. Demkin, N. B., ed. *Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti i v kontakte tverdykh tel i detalei mashin: mezhvuz. sb. nauch. tr.* Tver': TGTU, 2006.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Веселков Вячеслав Васильевич** —  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [VeselkovVV@gumrf.ru](mailto:VeselkovVV@gumrf.ru)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Veselkov, Vyacheslav V.** —  
Doctor of Technical Sciences, professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [VeselkovVV@gumrf.ru](mailto:VeselkovVV@gumrf.ru)

**Лобанов Николай Владимирович** —  
кандидат технических наук, доцент  
Филиал ФГАОУВО «Северный (Арктический)  
федеральный университет имени  
М.В. Ломоносова»  
164500, Российская Федерация, г. Северодвинск,  
ул. Капитана Воронина, 6  
e-mail: [sev.kppto@narfu.ru](mailto:sev.kppto@narfu.ru)

**Васильев Андрей Владимирович** — аспирант  
*Научный руководитель:*  
Веселков Вячеслав Васильевич  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
адмирала С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [an\\_vasss@mail.ru](mailto:an_vasss@mail.ru), [kaf\\_shipbuilding@gumrf.ru](mailto:kaf_shipbuilding@gumrf.ru)

**Lobanov, Nikolai V.** —  
PhD, associate professor  
Branch of Federal State Educational of Higher  
Education “Northern (Arctic) Federal University  
named after M.V. Lomonosov”  
6 Kapitan Voronin Str., Severodvinsk, 164500,  
Russian Federation  
e-mail: [sev.kppto@narfu.ru](mailto:sev.kppto@narfu.ru)

**Vasilev, Andrey V.** — Postgraduate  
*Supervisor:*  
Veselkov, Vyacheslav V.  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [an\\_vasss@mail.ru](mailto:an_vasss@mail.ru), [kaf\\_shipbuilding@gumrf.ru](mailto:kaf_shipbuilding@gumrf.ru)

*Статья поступила в редакцию 1 ноября 2017 г.  
Received: November 1, 2017.*