

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФРИКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ СБОРНЫХ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ*

В.И. Малыгин, Н.В. Лобанов, А.В. Васильев

Исследовалось влияние состояния сопрягаемых резьбовых поверхностей на характеристики трения при затяжке высоконагруженных болтовых соединений. Уточнена величина коэффициента трения в условиях, приближенных к реальным. Оценена стойкость к схватыванию поверхностей трения на пути трения, достаточном для затягивания рассматриваемых соединений.

Ключевые слова: трение, резьбовое соединение, стойкость к схватыванию.

Введение

Проблема механического соединения элементов ответственных конструкций, работающих в условиях больших нагрузок, при которых необходимо исключить разрушение соединения, весьма актуальна. В частности, такие соединения используются в производстве сборных гребных винтов с диаметрами до 8 м для судов ледового класса, где в качестве крепящих элементов применяются резьбовые соединения М85х4...М110х4. Необходимое усилие предварительной затяжки (до 2400 кН) требует создания большого момента, расчетное значение которого достигает 40 кН·м, что вызывает проблемы, особенно при монтаже и демонтаже лопастей непосредственно на судне в условиях дока или стапеля, а также в условиях эксплуатации.

Проблема усугубляется явлением схватывания поверхностей в резьбовых соединениях, детали которых изготовлены из нержавеющей сталей. Производственный опыт показывает, что в таких резьбовых соединениях местные схватывания поверхностей резьбы возникают довольно часто, в отдельных случаях приво-

дя к невозможности обеспечения требуемого усилия затяжки или ослабления соединения при демонтаже и, как правило, к неустранимым повреждениям резьбы болта и ступицы. В расчетах болтовых соединений «лопасть–ступица» по ОСТ 5.4023-80 коэффициент трения рекомендуется принимать равным: 0,13 – для кадмированных поверхностей резьбы без смазки; 0,1 – для кадмированных поверхностей со смазкой; 0,2 – для резьбовых поверхностей без покрытия и без смазки.

Задачей данного исследования явилось уточнение значений коэффициента трения пар материалов резьбовых соединений сборных гребных винтов в зависимости от давления на поверхности трения и различных видов покрытия поверхностей трения со смазкой и без смазки.

Исследование носило прикладной характер, поэтому условия его проведения конкретизировались особенностями используемых конструкций, а также материалов и технологии затяжки резьбовых соединений «лопасть–ступица» сборных гребных винтов.

* Работа выполнена в Северном (Арктическом) федеральном университете – головном исполнителе НИОКР «Освоение высокотехнологичного мелкосерийного производства наукоемкой продукции – отечественных импортзамещающих движительно-рулевых колонок и их компонентов для судов ледового класса» при финансовой поддержке проекта Министерством образования и науки РФ в рамках Постановления Правительства РФ № 218 от 9 апреля 2010 г.

Постановка и проведение исследования

Экспериментально определялись фрикционные свойства двух пар материалов:

- сталь 07X16H4Б-Ш – сталь 08X14HДЛ;
- сталь 07X16H4Б-Ш – бронза БРА9Ж4Н4МЦ.

Нержавеющая сталь 07X16H4Б-Ш ($\sigma_{0,2} = 690$ МПа; $\sigma_b = 834$ МПа) применяется как материал для изготовления болтов, нержавеющая сталь 08X14HДЛ ($\sigma_{0,2} = 510$ МПа; $\sigma_b = 648$ МПа) и бронза БРА9Ж4Н4МЦ ($\sigma_{0,2} = 245$ МПа; $\sigma_b = 590$ МПа) – как материал для производства ступиц и лопастей. Шероховатость поверхностей трения соответствовала реальной шероховатости поверхностей резьбы болта и ступицы $R_a = 1,6...2,5$ мкм.

Испытания проводились как без покрытия, так и с покрытием поверхности трения стали 07X16H4Б-Ш. В качестве покрытия использовалась газодинамически напыленная медь толщиной 12,5 мкм, которой обычно покрывают резьбу болтов. Для сравнения исследовались аналогичные покрытия алюминием и цинком. Испытания покрытых и непокрытых поверхностей трения проходили со смазкой и без смазки. Для смазки была выбрана антизадирная паста OKS 245, используемая при затяжке резьбовых соединений «лопасть–ступица».

Эксперименты проводились на специально спроектированной и изготовленной установ-

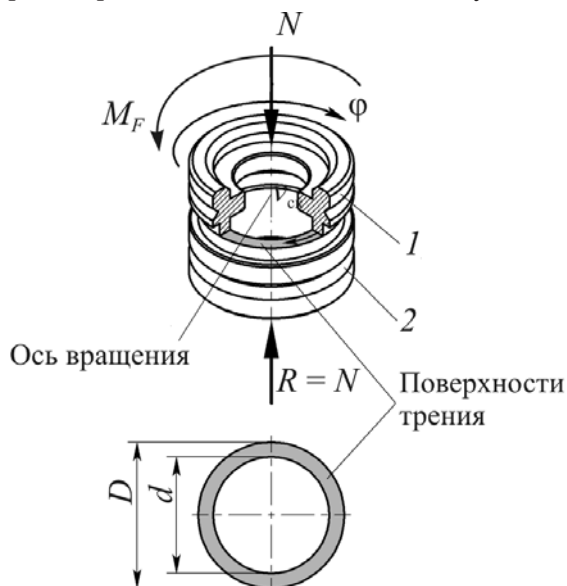


Рис. 1. Схема экспериментального соединения подвижного (1) и неподвижного (2) образцов; R – сила реакции опоры; N – нормальная сила давления; φ – угол поворота образца; M_F – момент трения

ке, размещенной на испытательной машине УМ-10. Коэффициент трения определялся на плоских поверхностях трения в условиях, воспроизводящих условия при затягивании резьбовых соединений «лопасть–ступица» сборных гребных винтов. Схема соединения подвижного и неподвижного образцов представлена на рис. 1.

Использовались образцы, имеющие плоские кольцевые (торцовые) поверхности трения: 1 – подвижный образец (сталь 07X16H4Б-Ш); 2 – неподвижный (сталь 08X14HДЛ, бронза БРА9Ж4Н4МЦ), с наружным диаметром D , внутренним d , площадью трения $A_F = \pi(D^2 - d^2)/4$. Трение скольжения со скоростью $v_{ск}$ на поверхностях создавалось вращением подвижного образца.

Нормальное давление p_N на поверхностях трения возникало под действием силы N , приложенной к подвижному образцу по оси вращения. Сила N измерялась с помощью тензометрического датчика с пределами измерения 10...100 кН, а момент трения M_F – с помощью моментного ключа с пределами измерения момента 40...450 Н·м.

Среднее нормальное давление p_N на поверхностях трения вычислялось как

$$p_N = N/A_F$$

Размеры поверхности трения образцов ($D = 36$ мм; $d = 31$ мм $\rightarrow A_F = 263$ мм²) позволяли создавать нормальное давление p_N на поверхностях трения до 380 МПа.

Коэффициент трения f_F определялся в предположении постоянства сил трения F по поверхности трения с использованием формулы

$$f_F = M_F/(ND_F);$$

$$D_F = \sqrt[2]{(D^3 - d^3)/(D^2 - d^2)}.$$

где M_F – измеряемый момент трения относительно оси вращения; D_F – приведенный диаметр сил трения.

Путь трения S_F находился на приведенном диаметре D_F по углу поворота образца φ в виде

$$S_F = \pi(D - d)\varphi/360,$$

а скорость скольжения $v_{ск}$ вычислялась по формуле

$$v_{ск} = S_F/t,$$

где t – время, измеряемое по секундомеру.

Скорость скольжения на поверхности трения выдерживалась в пределах значений, характерных для затягивания резьбовых соединений: 0,6...1,5 мм/с.

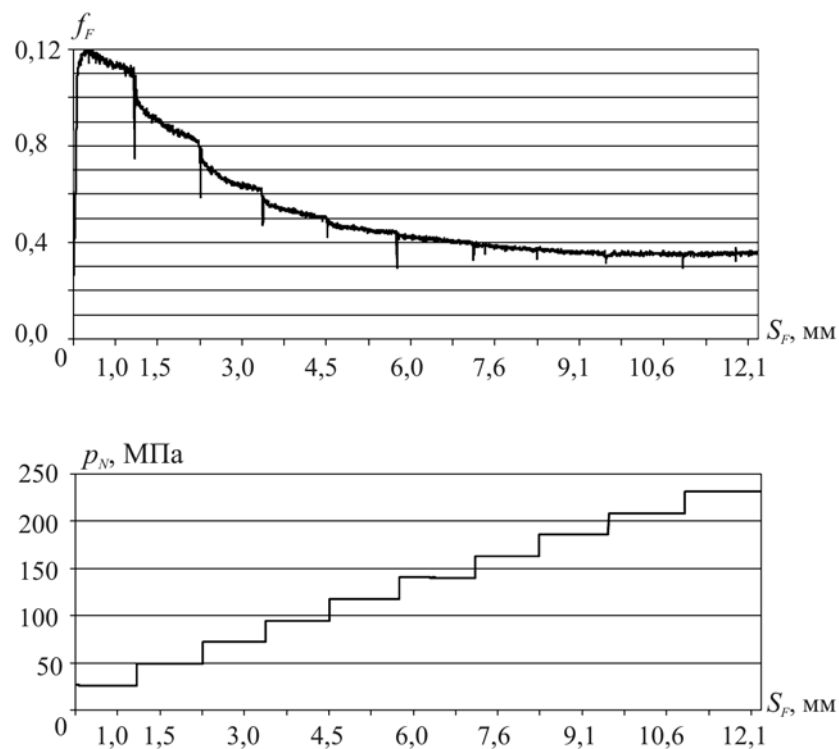


Рис. 2. Графики функций $f_F(S_F)$ и $p_N(S_F)$ для пары образцов 07X16H4Б-Ш – 08X14НДЛ без покрытия поверхностей трения, со смазкой OKS245 (нагружение А)

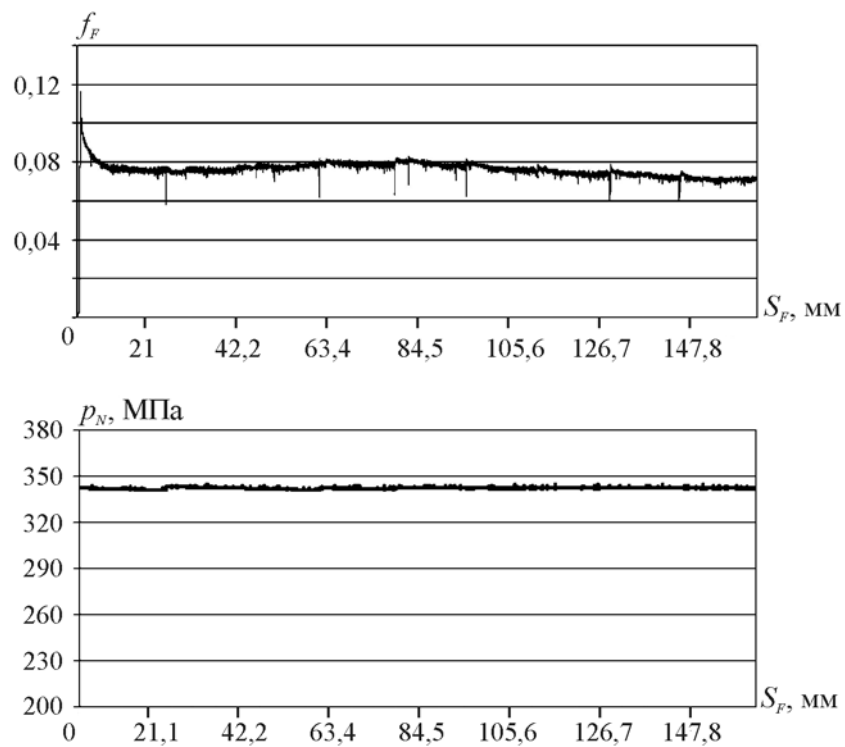


Рис. 3. Графики функций $f_F(S_F)$ и $p_N(S_F)$ для пары образцов 07X16H4Б-Ш – 08X14НДЛ с покрытием поверхности трения подвижного образца медью, со смазкой OKS245 (нагружение В)

Сигналы тензодатчиков и моментного ключа регистрировались тензометрической станцией ZET 017-T8. По результатам их обработки строились синхронные графики расчетных зависимостей коэффициента трения $f_F(S_F)$ и среднего нормального давления $p_N(S_F)$ на поверхности трения от пути трения.

Расчетные средние давления на поверхности самого нагруженного витка резьбы для болтов типоразмеров М85×4...М100×4 составляли:

- 170...240 МПа – для ступиц из стали 08Х14НДЛ;
- 60...85 МПа – для ступиц из бронзы БРА9Ж4Н4МЦ.

Реальные же давления в резьбе из-за погрешностей изготовления профиля резьбы и перекосов болта в резьбовом отверстии ступицы могут быть намного больше.

Указанные условия в экспериментах реализовывались при ступенчато возрастающей силе N (нагружение A) и при постоянной силе N (нагружение B). Всего было испытано 92 пары образцов.

В случае нагружения A давление до выбранного значения увеличивалось десятью равными приращениями (ступенями), на каждой ступени путь трения принимался равным $S_F = 1,2...1,5$ мм так, чтобы суммарный путь трения составлял $S_F = 12...15$ мм.

Реальное максимальное давление на поверхностях трения образцов ($p_N = 380$ МПа) примерно в 2 раза превышало расчетное в резьбе для ступиц из стали 08Х14НДЛ и в 5 раз – для ступиц из бронзы БРА9Ж4Н4МЦ. Реальный путь трения в резьбе при затягивании оказался значительно больше расчетного и составил для болтов М85×4...М100×4 примерно 60...70 мм. Эта разница объясняется наличием начальных зазоров и контактной податливостью в стыках резьбового соединения.

Для сравнительной оценки стойкости пар трения к схватыванию в реальных условиях коэффициент трения определялся при постоянном давлении (нагружение B). В качестве критерия стойкости к схватыванию принимался путь трения, при котором коэффициент трения не превышал 0,2.

Примеры зависимостей коэффициента трения f_F и среднего нормального давления p_N на поверхности трения от пути трения S_F представлены на рис. 2 и рис. 3.

Результаты исследования

1. Испытание эталонных пар образцов «сталь 07Х16Н4Б-Ш – бронза БРА9Ж4Н4МЦ»

При затягивании резьбовых соединений «болт – ступица (гайка)» (сталь 07Х16Н4Б-Ш – бронза БРА9Ж4Н4МЦ) схватывания резьбовых поверхностей не возникало, а момент при затягивании не превосходил расчетного, определенного предварительно с коэффициентом трения, равным 0,12. Эксперименты с указанной парой трения выполнялись как эталонные.

• Без смазки

При давлениях $p_N = 70...240$ МПа (нагружения A и B) и путях трения $S_F \leq 70$ мм зависимостей коэффициента трения от давления и пути трения не наблюдалось. В момент начала скольжения (страгивания) коэффициент трения покоя составлял $f_F = 0,11...0,13$, затем резко (на пути трения $S_F = 1...3$ мм) снижался до значений $f_F = 0,09...0,11$ и далее практически не менялся. При нагружении B до давления $p_N = 380$ МПа коэффициент трения на пути трения $S_F = 30...45$ мм непрерывно возрастал от значений $f_F = 0,10...0,11$ (коэффициент трения покоя) до значения $f_F = 0,2$.

• Со смазкой OKS 245

При давлениях $p_N = 70...240$ МПа (нагружения A и B) коэффициент трения покоя практически не зависел от давления и составлял $f_F = 0,10...0,11$. После начала скольжения коэффициент трения плавно снижался до значений $f_F = 0,035...0,065$ на пути трения $S_F = 18...25$ мм, затем оставался постоянным как минимум до значения $S_F = 70$ мм.

При давлении $p_N = 380$ МПа (нагружение B) коэффициент трения покоя составлял $f_F = 0,065...0,09$, затем на пути трения $S_F = 18...25$ мм плавно снижался до значений $f_F = 0,032...0,050$, после чего начинал возрастать, достигая значений $f_F = 0,05...0,07$ при $S_F = 70$ мм.

2. Испытание пар стальных образцов 07Х16Н4Б-Ш – 08Х14НДЛ без покрытия

• Без смазки

При нагружении A резкий рост коэффициента трения ($f_F \geq 0,25$) начинался уже при давлениях $p_N \geq 40$ МПа. Наблюдалось образование задиров по всей поверхности трения.

• Со смазкой OKS 245

При нагружении A до давления $p_N = 380$ МПа в момент страгивания коэффициент трения покоя составлял $f_F = 0,10...0,12$, а при скольже-

нии коэффициент трения плавно снижался до значений $f_F = 0,035...0,065$.

При постоянном нагружении B до давления $p_N = 240$ МПа в момент страгивания коэффициент трения покоя составлял $f_F = 0,10...0,11$, затем на пути трения $S_F = 20...25$ мм плавно снижался до значений $f_F = 0,055...0,065$, после чего повышался до значений $f_F = 0,10...0,13$ при $S_F = 70$ мм.

3. Испытание пар стальных образцов 07X16H4Б-Ш – 08X14НДЛ с покрытием Cu, Al, Zn поверхности трения подвижного образца

• Без смазки

При использовании медного покрытия (Cu) и ступенчатом нагружении A до давления $p_N = 380$ МПа коэффициент трения практически не менялся и находился в пределах $f_F = 0,09...0,12$. При нагружении B до давления $p_N = 240$ МПа на пути трения $S_F = 25...40$ мм коэффициент трения был почти постоянным ($f_F = 0,09...0,10$), затем плавно возрастал, достигая значений $f_F = 0,13...0,14$ при $S_F = 70...100$ мм.

При использовании алюминиевого покрытия (Al) и ступенчатом нагружении A до давления $p_N = 380$ МПа коэффициент трения покоя составлял $f_F = 0,10...0,12$, а при скольжении плавно снижался до значений $f_F = 0,065...0,08$. При нагружении B до давления $p_N = 240$ МПа коэффициент трения в момент страгивания составлял $f_F = 0,09...0,11$, снижаясь на пути трения $S_F = 12...20$ мм до значений $f_F = 0,065...0,08$, затем оставался практически постоянным как минимум до $S_F = 150$ мм.

При использовании цинкового покрытия (Zn) и ступенчатом нагружении A до давления $p_N = 240$ МПа коэффициент трения практически не менялся и находился в пределах $f_F = 0,07...0,09$. При нагружении A до $p_N = 380$ МПа коэффициент трения от значений при страгивании ($f_F = 0,09...0,11$) повышался до значений $f_F = 0,14...0,16$. При нагружении B при $p_N = 240$ МПа коэффициент трения увеличивался до $f_F = 0,2$ на пути трения $S_F = 30...40$ мм, а при давлении $p_N = 380$ МПа – на пути $S_F = 12...20$ мм. Рост коэффициента трения сопровождался разрушением слоя покрытия и переносом его фрагментов на поверхность другого образца.

• Со смазкой OKS 245

При использовании медного (Cu) и алюминиевого (Al) покрытий в ходе ступенчатого нагружения A до давления $p_N = 380$ МПа коэффициент трения покоя $f_F = 0,1...0,12$ при

скольжении снижался до $f_F = 0,08...0,085$. При нагружении B до $p_N = 380$ МПа коэффициент трения покоя при страгивании составлял $f_F = 0,1...0,11$, снижаясь на пути трения $S_F = 15...30$ мм до $f_F = 0,06...0,085$, затем оставался практически постоянным как минимум до $S_F = 150$ мм.

Обсуждение полученных результатов

Результаты проведенных экспериментов можно считать ожидаемыми, так как качественно они не противоречат имеющимся данным.

В целом для всех исследованных материалов пар трения, как со смазкой, так и без нее, коэффициент трения в первую очередь зависит от пути трения скольжения. После страгивания коэффициент трения снижается до минимума и стабилизируется на некотором участке пути трения, после чего начинает расти.

Давление на поверхности трения в основном определяет величину пути трения, на котором коэффициент трения снижается и остается постоянным.

Использование смазки OKS 245 не влияет на коэффициент трения покоя, но значительно уменьшает коэффициент трения скольжения, особенно с увеличением пути трения. При этом растет разброс значений коэффициента трения скольжения по сравнению с сухим трением.

I. В паре трения стальных образцов 07X16H4Б-Ш – 08X14НДЛ без смазки и покрытия при давлениях 30...40 МПа начинается схватывание и возникают задиры по всей поверхности трения при небольшом (3...5 мм) пути трения. Это подтверждает склонность такой пары материалов к схватыванию поверхностей при трении.

II. В паре трения «сталь 07X16H4Б-Ш – бронза БРА9Ж4Н4МЦ» без смазки при давлении $p_N = 380$ МПа (в 5 раз выше расчетных для ступиц из БРА9Ж4Н4МЦ) на пути трения 12...15 мм (расчетный путь трения при затягивании) коэффициент трения не превышает значения 0,11. При давлениях $p_N \leq 240$ МПа коэффициент трения не превышает 0,12 при пути трения $S_F = 70$ мм (реальный путь трения при затяжке болтов М85×4...М100×4).

Использование смазки OKS 245 снижает коэффициент трения скольжения в 1,5...3 раза и обеспечивает его стабильность на пути трения как минимум до значения $S_F = 70$ мм при давлениях до $p_N = 380$ МПа.

Учитывая, что соответствующего снижения момента при затягивании болтов не происходит, можно сделать вывод, что реальные условия смазывания отличаются от экспериментальных в худшую сторону. Поэтому в расчетах следует ориентироваться на результаты испытаний без смазки, считая их воспроизводящими самые неблагоприятные условия трения в резьбе при затягивании.

III. В паре трения стабильности образцов 07X16H4Б-Ш – 08X14HДЛ с покрытием подвижной поверхности 07X16H4Б-Ш медью или алюминием без смазки при давлениях до $p_N = 380$ МПа (в 1,5...2 раза выше расчетных для ступиц из 08X14HДЛ) на пути трения 12...15 мм схватывание отсутствует, а коэффициент трения не превышает 0,12. При давлениях до $p_N = 240$ МПа схватывание отсутствует, а коэффициент трения не превышает 0,14 на пути трения $S_F = 70$ мм.

Покрытие Al по сравнению с Cu обеспечивает заметно меньший коэффициент трения скольжения, причем на значительно большем пути трения. Покрытие Zn имеет намного меньшую стойкость к схватыванию по сравнению с покрытиями Cu или Al.

При использовании смазки OKS 245 при давлениях до 380 МПа коэффициент трения покоя не превышает 0,12, а коэффициент трения скольжения снижается до 0,08 на пути трения 15...30 мм и остается постоянным на пути трения не менее 150 мм.

Как уже указывалось, в производственных условиях при затягивании болтовых соединений «лопасть – ступица», в которых болт и ступица (гайка) изготовлены из нержавеющей стали, схватывание резьбовых поверхностей возникает довольно часто, несмотря на покрытие резьбы болта медью и использование антизадирной смазки. Анализ полученных экспериментальных результатов позволяет предположить, что это явление в основном связано с тем, что реальное давление на поверхностях резьбы при затягивании намного превышает расчетное, в первую очередь на кромках поверхностей резьбы.

Выводы и практические рекомендации

Проведенные исследования показали, что для снижения вероятности схватывания поверхностей резьбы и момента трения при затягивании болтов необходимо уменьшать максимальное давление в резьбе, снижая неравномерность распределения нагрузки по ее виткам и устраняя кромочные контакты корригированием профиля резьбы. Кроме того, целесообразно заменить медное покрытие поверхности резьбы на алюминиевое, обеспечивающее при сухом трении меньший коэффициент трения и большую стойкость к схватыванию.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования являются весьма полезными для оценки фрикционных характеристик материалов высоконагруженных резьбовых соединений, применяющихся для гребных винтов.

Параметры испытаний образцов с плоскими торцовыми поверхностями трения соответствовали условиям, воспроизводящим реальные. Такими параметрами являлись значения скорости и пути скольжения, а также ширина поверхности трения, близкая к ширине витка используемой резьбы.

В проводимых экспериментах максимальное давление на поверхности образцов в 2 раза превышало среднее расчетное для ступиц из стали и в 5 раз для ступиц из бронзы. Дальнейшее увеличение давления ограничивалось возможностями установки. Среднее расчетное давление можно считать оценкой снизу реального давления. В дальнейшем планируется получение расчетной оценки сверху максимального давления в резьбе с учетом пластической деформации витков резьбы.

Список литературы

1. Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые и фланцевые соединения. – М.: Машиностроение, 1990. – 368 с.
2. Иванов А.С. Методы повышения надежности машин // Вестник машиностроения. 2009. № 2. С. 40–42.

Материал поступил в редакцию 12.03.13.

МАЛЫГИН

Владимир Иванович

E-mail: v.malygin@narfu.ru

Тел.: (8184) 58-07-89

Доктор технических наук, профессор Института судостроения и морской арктической техники Северного (Арктического) федерального университета. Сфера научных интересов – автоматизация проектирования средств технологического оснащения. Автор более 190 научных работ.

ЛОБАНОВ

Николай

Владимирович

E-mail: istik029@rambler.ru

Тел.: (8184) 58-07-89

Кандидат технических наук, доцент Института судостроения и морской арктической техники Северного (Арктического) федерального университета. Сфера научных интересов – математическое моделирование физических процессов при резании, прикладная механика и механообрабатывающее оборудование. Автор более 20 научных работ.

ВАСИЛЬЕВ

Андрей

Владимирович

E-mail: an_vasss@mail.ru

Тел.: (8184) 59-62-34

Аспирант Института судостроения и морской арктической техники Северного (Арктического) федерального университета, ведущий инженер-конструктор ОАО «Центр судоремонта «Звездочка». Сфера научных интересов – исследование и разработка новых конструкций высоконагруженных болтовых соединений (ВНБС) сборных гребных винтов, новые методы расчета ВНБС с помощью конечно-элементного моделирования. Автор одной научной работы и трех патентов.