

14. Skotnikova M.A., Breki A.D., Evsinc M.G., Kalinin V.Y. Wasilewski M.R. Influence of the Concentration and Particle Size of Rock Powders on the Anti-Wear Properties of Oils // AIP Conference Proceedings, 2021, 2340, 060005. DOI: 10.1063/5.0047387.

15. Syundyukov, I., Skotnikova, M., Padgurskas, J., Tsvetkova, G., Tarasenko, E. Wearproof structural and phase status of the surface of preparation of steel 45 after plasma spraying of powder PN85Y15 // Materials Today: Proceedings, 2019, 30, pp. 650–655. DOI: 10.1016/J.MATPR.2020.01.454

E. O. Kuoma  
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University  
Saint Petersburg, Russia. kuk.kukob@yandex.ru

## RESEARCON ON SPEED OF DRYING FOR POLYMERS AFTER FRICTION IN WATER

### Abstract

The phenomenon of water absorption during operation in conditions of water lubrication of carbon fiber plain bearings paired with steel bearings made with various types of carbon fiber interlacing is considered. The swelling of the carbon fiber was observed, which led to inaccuracy in measuring its wear. During tribotechnical tests according to the pad-roller scheme, changes in torque, coefficient of friction, mass of the roller, pads, temperature of pads and water were recorded in conditions of aqueous lubrication. After the tests, the actual wear of the pad and its drying rate are determined.

*Key words:* carbon fiber, bearing, water lubrication

УДК 620.193.272

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-251

А.К. Леонов<sup>1</sup>, Wu Jianguy, М.А. Скотникова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, leonov\_anton@bk.ru

<sup>2</sup>Jiangsu Pedagogical University, Xuzhou, 101 Shanghai Road, China

## СТОЙКОСТЬ СПЛАВОВ В МОРСКОЙ ВОДЕ

### Аннотация

С помощью методов оптической металлографии и электрохимического окрашивания проведено систематическое исследование особенностей разрушения структурно и кристаллографически текстурированных титановых заготовок после малоцикловых испытаний в синтетической морской воде, содержащей 3,5 % NaCl. Показано, что за снижение малоцикловой выносливости ответственны коррозионно нестойкие структурно и кристаллографически выделенные области с базисной ориентацией границ раздела и шириной 20-30 мкм, которые периодически с шагом 100-170 мкм залегали по всей толщине заготовки. Показано, что для сталей аустенитного класса существует двойственность относительно наличия хлора в морской воде: он снижает активность микробиологической коррозии, но повышает риск питтинговой и щелевой коррозии.

*Ключевые слова:* коррозия, морская вода, микробиологическая, питтинговая, щелевая коррозия и коррозионное растрескивание.

## Введение

В настоящее время, Правительством Российской Федерации взят вектор на развитие Северного морского пути. План включает более 150 мероприятий, в том числе, строительство морских перегрузочных технологических линий транспортировки сжиженного природного газа, газового конденсата, а также нефтегазоналивного и угольного терминалов.

В связи с вышеописанным, остро стоит вопрос о выборе основных материалов стойких к коррозионному износу для изготовления, как основного, так и вспомогательного оборудования, применимого в условиях одновременного воздействия морской воды, атмосферы и малоцикловых вибраций корпуса плавучего судна.

К основным видам коррозии металлов и сплавов в морской воде следует отнести коррозию: микробиологическую; щелевую; питтинговую и коррозионное растрескивание. Морская вода, содержит 3,5 % - ый раствор NaCl, в котором хлорид-ион сдвигает потенциал атомов металла в сторону меньшей электроотрицательности, тем самым увеличивая скорость коррозии. Ионы хлора легко адсорбируются оксидными пленками на поверхности металлов, и вытесняют из них кислород (пассиватор), растворяя пассивирующие пленки и образуя при этом растворимый хлорид металла. [1].

Нержавеющие высокохромистые стали, сплавы на основе титана, алюминия имеют высокую стойкость против общей коррозии, однако в средах с повышенным содержанием ионов хлора, к которым относится и морская вода, они могут быть подвержены микробиологической, питтинговой коррозии и коррозионному растрескиванию.

### *Микробиологическая коррозия*

Микробиологическая коррозия – это тип коррозии, вызванный бактериями или микроорганизмами (Рис. 1) [2].



Рисунок 1 – Изображения продуктов коррозии на поверхности металла:  
а) общий вид; б) детальный вид коррозионного износа. (а) x5; (б) x10.

Биологическое обрастание поверхности погруженных плавучих объектов возникает в результате развития естественной морской биоты. Каждый организм выбирает идеальные условия для существования, поэтому вертикальное распределение обрастателей как на подвижных, так и на неподвижных поверхностях определяется многими факторами: освещенностью, скоростью потока воды, глубиной и др. Места крепления биообрастателей в первую очередь определяются гидрофильностью и адсорбционной способностью материала, а уже во-вторых –

характером и интенсивностью потока воды вдоль поверхности, а также микротурбулентностью в точках, где этот поток нарушается [3]. Наиболее изученным видом микробиологической коррозии является бактериальная коррозия [4].

#### *Питтинговая коррозия*

Питтинговая коррозия (Рис. 2) является наиболее разрушительной формой коррозии, поскольку полости (“питтинги”) возникают на локальных, трудно обнаружимых участках поверхности. Причиной возникновения и распространения питтингового коррозионного износа служат гетерогенные включения [5], локальные дефекты защитной коррозионностойкой пленки: трещины, царапины, задиры т.д.

Механизм питтинговой коррозии носит электрохимический характер: “питтинг”, при его образовании, становится анодом, а основной металл – катодом (Рис. 2).

Влияния различных факторов на коррозию в морской воде сложны и в некоторых случаях противоречивы вследствие их взаимодействия, а также доминирования одного фактора над другими. Высокое содержание солей в морской воде приводит к большой электропроводности, что является причиной увеличения скорости коррозии. Влияние солености морской воды на коррозию максимально при концентрации NaCl более 10 % [9]. Катализаторами (ускорителями) питтинговой коррозии выступают: хлориды, которые загрязняют поверхность металла и препятствуют пассивации поверхности; кислород, который ускоряет катодную реакцию; остаточный хлор, который является сильным окислителем и попадая в “питтинг”, локально понижает рН среды в полости.



Рисунок 2 – Внешний вид питтингов на поверхности металла

#### *Щелевая коррозия*

Щелевая коррозия – это вид локальной коррозии, возникающей внутри “щелей”, образованных парами металл-металл и металл-неметалл. По механизму разрушения, щелевая коррозия (Рис. 3), идентична питтинговому разрушению. Основное отличие – механизм зарождения разрушения. Инициаторами щелевой коррозии являются небольшие щели, образующиеся на границе соприкосновения двух контактирующих пар или под отложениями на поверхности.





Рисунок 3 – Внешний вид щелевой коррозии

В такие щели может проникнуть жидкость, образовав застойную зону и, при этом, ограничив доступ кислорода извне для поддержания целостности пассивного слоя металла. Это приводит к ослаблению пассивного слоя металла, накоплению ионов растворенных металлов внутри щели и, как следствие, к снижению pH среды в полости щели. Далее, процесс разрушения протекает по сценарию питтинговой коррозии [6].

Особенно чувствительны к щелевой коррозии некоторые металлы, пассивное состояние поверхности которых, обеспечивается доступом окислителей. К ним относятся в первую очередь нержавеющие стали, алюминиевые и титановые сплавы, являясь при этом важнейшими конструкционными материалами [7].

#### *Выбор нержавеющей сталей и контроль условий эксплуатации*

Основным методом профилактики коррозионного разрушения является правильный выбор марок сталей по содержанию легирующих элементов. Так, с повышением содержания хрома, молибдена и азота в стали, повышается ее коррозионная стойкость [8-9]. Например, такие марки сталей, как 10X17H3M2T и 12X18H12M3TЛ обладают высокой коррозионной стойкостью в морской воде [10].

Другим распространенным способом превентивной защиты от коррозионного разрушения является контроль внешних и внутренних условий эксплуатации. Контроль внешних условий, например, влажности воздуха и внутренних, например, ограничения воздействия воды, температуры среды, регулирования уровня pH среды, концентрации хлоридов и остаточного хлора. Так, контроль температуры позволяет избегать критических температур питтингообразования; снижение концентрации хлоридов – уменьшать интенсивность катодной реакции на поверхности стали; контроль остаточного хлора (хлоринов) – создавать неблагоприятную среду для жизнедеятельности микроорганизмов [11]. Ингибиторы, при добавлении которых в небольших количествах, замедляется коррозия, различаются по механизму и характеру действия [12]: пассивирующие и адсорбционные; по химической природе типов сред: кислых коррозионных, сероводородных, нефтяных, нейтральных, атмосферных; по степени блокировки поверхности металла [13-14].

#### *Коррозионное растрескивание*

Коррозия под напряжением возникает под действием постоянных или циклических механических нагрузок в коррозионной среде (3,5 % NaCl). Коррозионное растрескивание (КР) является одним из самых трудно предсказуемых и наиболее опасных видов разрушения, проявляющихся при эксплуатации высокопрочных сталей и сплавов в морской воде.

На рисунке 4 представлены результаты испытания авторов [15] методом

консольного изгиба на КР в морской воде при ступенчато возрастающей нагрузке высокопрочных сталей различных структурно-фазовых составов.

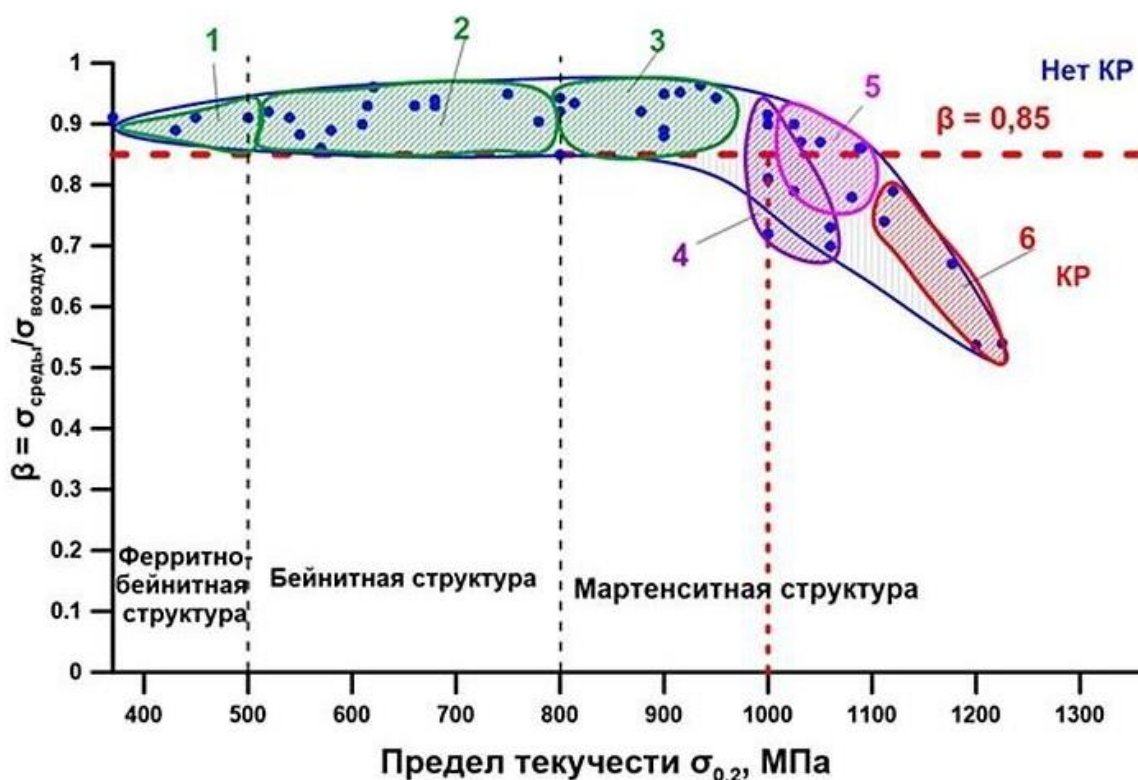


Рисунок 4 – Зависимость показателя склонности к КР,  $\beta$ , полученного при испытании в 3,5% NaCl методом ступенчатого консольного изгиба, от предела текучести: 1– ферритно-бейнитные низколегированные стали; 2 – бейнитно-мартенситные среднелегированные стали; 3, 6 – мартенситные легированные стали; 4– низкоуглеродистые мартенситные стали; 5 – среднеуглеродистые мартенситные стали [15].

Установлено, что стали с ферритно-бейнитной, бейнитно-мартенситной и мартенситной структурой и с соответствующими значениями предела текучести в интервале от 370 до 1000 МПа, не проявляют склонность ( $\beta$ ) к КР в условиях общей коррозии (области 1-3, Рис. 4).

Наибольшую склонность к КР показали мартенситные низко- и среднеуглеродистые легированные стали с пределом текучести 1200 МПа (область 6, Рис. 4).

### Методы и материалы

Испытания проводили на малоцикловых образцах из титанового сплава ПТ-5В с кольцевым надрезом, вырезанных из поверхностного слоя заготовок так, что их ось была параллельна направлению прокатки (Рис. 5, 7, а). Образцы в количестве 120 штук испытывались в 3,5 % - ом растворе NaCl, в режиме от нулевого растяжения при пульсирующем цикле нагружения с частотой 2-3 цикла/мин с амплитудой приложенного напряжения 0,8 и 0,7 от среднего значения предела текучести (Рис. 5).

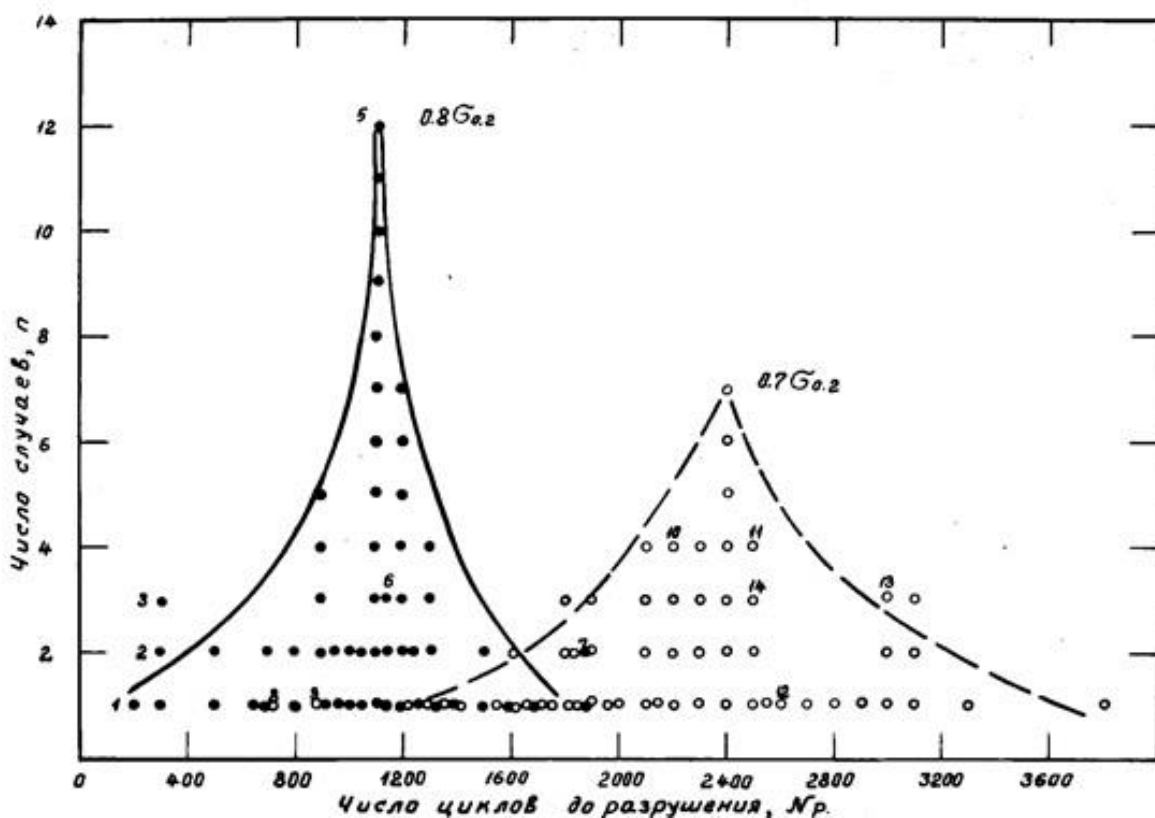


Рисунок 5 – Результаты испытания сплава ПТ-5В на малоцикловую выносливость

### Результаты и обсуждение

Как показали результаты испытаний, число циклов до разрушения изменялось от 200 до 1900 и от 700 до 3800 циклов, соответственно. Таким образом, с уменьшением уровня приложенного напряжения увеличивался разброс значения числа циклов до разрушения.

Фрактографический анализ макро- и микро-топографии изломов испытанных образцов (Рис. 6, а-б) позволил заключить, что по мере увеличения длины магистральной трещины и уменьшения живого сечения образца, на его поверхности формировались четыре характерные зоны разрушения (Рис. 6, в-г). На смену области зарождения усталостной трещины (зона I) приходила область её стабильного распространения с большими полями регулярных усталостных бороздок (зона 2). Далее наблюдали область ускоренного роста трещины, где механизм усталостного разрушения дополнялся механизмом однократного коррозионного растрескивания (зона 3). И, наконец, область долома, соответствующая быстрому статическому разрушению заключительной части образца (зона 4).

Микротопография зоны коррозионного растрескивания 3, представляла собой мозаику разориентированных фасеток скола «Г (1010)» (Рис. 7, б) и перпендикулярных к ним колоний макробороздок «К (0001)» (Рис. 7, в). На изломах образцов, разрушенных на воздухе, несмотря на наличие макробороздок, фасеток скола, связанных с коррозионным растрескиванием, обнаружено не было (Рис. 7, б).

На изломах образцов с низкими значениями числа циклов до разрушения зона коррозионного охрупчивания занимала большую часть поверхности и выходила на край образца. Цветное электрохимическое окрашивание металла образцов непосредственно под изломом позволило выявить в местах коррозионного растрескивания наличие структурно и кристаллографически выделенных областей с базисной ориентацией границ раздела и шириной 20-30 мкм, которые периодически

с шагом 100-170 мкм залегали по всей толщине заготовки (Рис. 6, д-е).

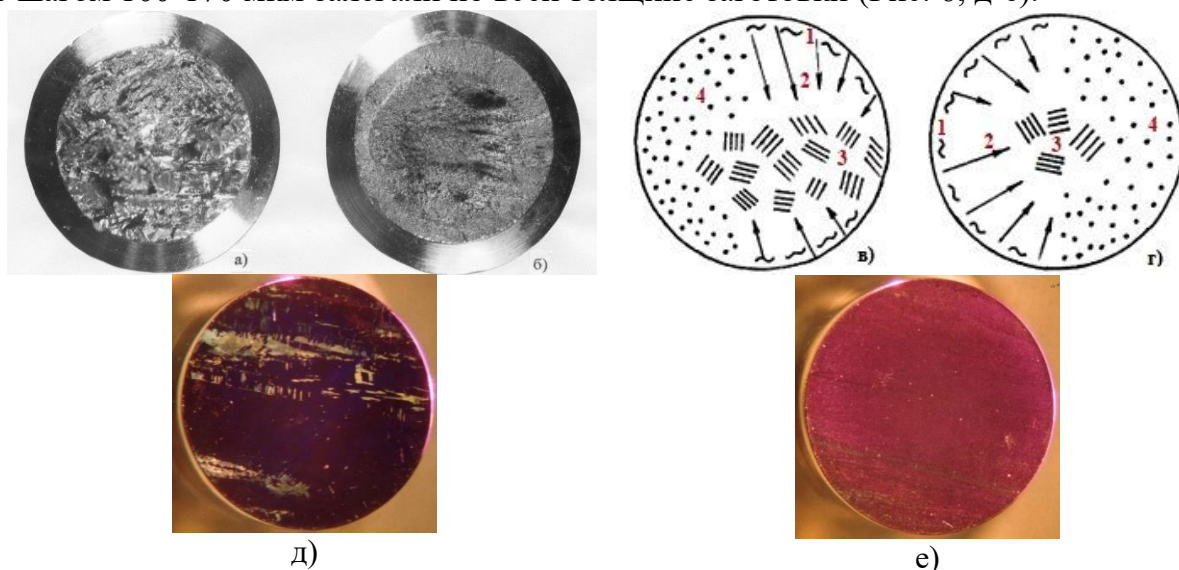


Рисунок 6 – Характерные изломы (а, б), схемы разрушения (в, г) и структурно - кристаллографически выделенные области с базисной ориентацией границ раздела, выявленные цветным электрохимическим окрашиванием малоцикловых образцов (д, е), испытанных в 3% растворе NaCl с низкими (N=269, а, в, д) и высокими (N=1885, б, г, е) значениями числа циклов до разрушения.

На изломах образцов с высокими значениями числа циклов до разрушения зона коррозионного растрескивания или совсем отсутствовала, или имела место, но располагалась в средней части излома. Цветное электрохимическое окрашивание таких образцов выявило отсутствие вытянутых частиц  $\alpha$ -фазы с базисной ориентацией границ раздела в плоскости распространения магистральной трещины.

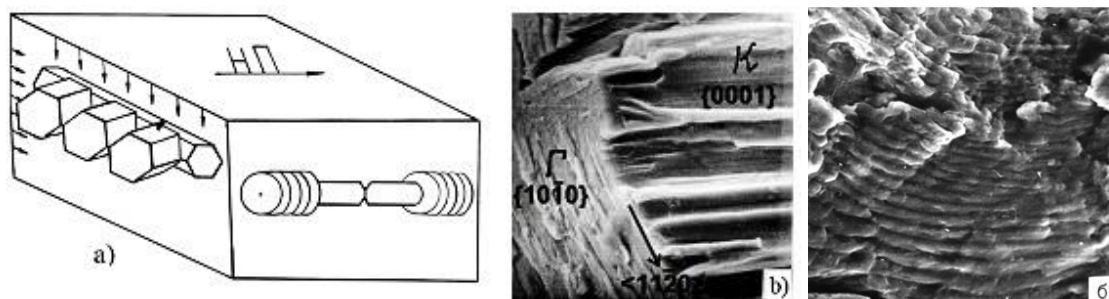


Рисунок 7 – Схема разрушения (а) и характерный вид излома малоцикловых образцов после испытания в морской воде (б) и на воздухе (б).

### Заключение

В морской воде существует риск развития основных видов коррозии: микробиологической, щелевой, питтинговой и коррозионного растрескивания.

Существует двойственность относительно наличия хлора в морской воде. Он снижает активность микробиологической коррозии, но повышает риски питтинговой, щелевой коррозии и коррозионного растрескивания.

Показано, что за снижение малоцикловой выносливости ответственны коррозионно нестойкие структурно и кристаллографически выделенные области с базисной ориентацией границ раздела и шириной 20-30 мкм, которые периодически с шагом 100-170 мкм залегали по всей толщине заготовки. Чем ниже уровень приложенного напряжения во время циклического испытания образца, чем больший вклад в суммарное время его жизни вносит стадия зарождения трещины, тем важнее

становится учёт количества и геометрии расположения в объёме плоских заготовок таких структурно и кристаллографически выделенных областей, влияющих на изменение макромеханизма разрушения испытываемых образцов.

### **Благодарности**

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00178, <https://rscf.ru/project/22-19-00178/>

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Dr. Sami A. Ajeel, Basheer A. Abdul-Hussein, Yaqoob M. Baker. Electrochemical measurements of anodizing stainless steel type AISI 304 / International Journal of mechanical engineering and technology. Volume 4, Issue 3, May - June (2013), pp. 63-74.
2. Loto C. A. Microbiological corrosion: mechanism, control and impact - a review // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2017. - Т. 92. - №. 9-12. pp. 4241-4252.
3. Варченко Е.А. Влияние параметров коррозионной среды на свойства конструкционных металлических материалов при проведении испытаний в морской воде (обзор) / Е.А. Варченко, М.Г. Курс // Труды ВИАМ - 2019 - 85 с.
4. Каблов Е.Н. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии / Е.Н. Каблов, О.В. Старцев, И.М. Медведев // Авиационные материалы и технологии - 2015 - 84 с.
5. Кайдриков Р.А. Питинговая коррозия металлов и многослойных систем (исследование, моделирование, прогнозирование, мониторинг) / Р.А. Кайдриков, С.С. Виноградова // Технология химических производств - 2010 - 212 с.
6. A. Iversen, B. Leffler Corrosion and Degradation of Engineering Materials // Corrosion, 2010.
7. Варченко Е.А. Щелевая коррозия алюминиевых сплавов и нержавеющей сталей в морской воде / Е.А. Варченко, М.Г. Курс // Труды ВИАМ - 2018 - 96 с.
8. Гуляев А.П. Металловедение // М: Металлургия. - 1986. - 408 с.
9. ASME BPVC Section II, Part A – 2019.
10. Худякова, Л.П. Исследование коррозионной стойкости сталей к воздействию морской воды / Л.П. Худякова, И.А. Флегентов, Р.А. Харисов, О.Ю. Жвелев, А.А. Шестаков, И.Р. Фархетдинов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. - 2020 - 89 с.
11. Xometry T. How to Prevent Pitting Corrosion // Xometry. - 2021.
12. Сидняев Н.И. Исследование влияния морской воды на деструкцию погружных морских конструкций / Сидняев Н.И., М.А. Бережнова // Наука и инновации - 2019 - 3 с.
13. Козлова Л.С. Ингибиторы коррозии (обзор) / Л.С. Козлова, С.В. Сибилева, Д.В. Чесноков, А.Е. Кутырев // Авиационные материалы и технологии - 2015 - 68 с.
14. ISO 21452 Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Materials selection and corrosion control for oil and gas production systems - 2010
15. Костин С.К. Коррозионное растрескивание в морской воде высокопрочных сталей различного структурно-фазового состава: дис...канд. техн. наук: 05.16.09: защищена 25.04.18.

A.K. Leonov<sup>1</sup>, Wu Jiangyu<sup>2</sup>, M.A. Skotnikova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
St. Petersburg, Russia, leonov\_anton@bk.ru

<sup>2</sup>Jiangsu Pedagogical University, Xuzhou, 101 Shanghai Road, China

## **RESISTANCE OF ALLOYS IN SEAWATER**



## Abstract

Using the methods of optical metallography and scanning electron microscopy, a systematic study of the features of destruction of structurally and crystallographically textured titanium blanks after low-cycle tests in synthetic seawater containing 3% NaCl was carried out. It is shown that corrosion-resistant structurally and crystallographically isolated regions with a basic orientation of the interface and a width of 20-30 microns, which periodically lay over the entire thickness of the workpiece in increments of 100-170 microns, are responsible for reducing fatigue life. It is shown that for austenitic steels there is a duality regarding the presence of chlorine in seawater: it reduces the activity of microbiological corrosion, but increases the risk of pitting and crevice corrosion.

*Keywords:* corrosion, seawater, microbiological, pitting, crevice corrosion and corrosion cracking.

УДК 621.01

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-252

Жаров В.Е.<sup>1</sup>, Наумов А.Н.<sup>2</sup>, Е.Б. Седакова<sup>2,3</sup>, Ли Сяньшунь<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия, elenasedakova2006@yandex.ru

<sup>3</sup> Jiangsu Pedagogical University, Xuzhou, 101 Shanghai Road, China

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ТРИБОТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАПОЛНЕНИЯ ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНА МЕНЕЕ ИЗНОСОСТОЙКИМ ДИСПЕРСНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ ПРИ ИЗНАШИВАНИИ ПО СТАЛИ

### Аннотация

Исследована возможность применения наноразмерных частиц меди в качестве наполнителя для полиэфирэфиркетона (ПЭЭК). На основе физической модели изнашивания проведено исследование возможности разработки триботехнически эффективного композита с наполнителем низкой износостойкости, построены расчетные концентрационные зависимости относительной интенсивности линейного изнашивания композита по отношению к матрице для четырех размеров дисперсного наполнителя из нано и микроразмерного диапазона. В результате определены диапазоны эффективных концентраций наполнителя при введении в ПЭЭК наномеди. Для исследования причин повышения износостойкости нанокompозита при введении дисперсных частиц меди применен метод молекулярной динамики. Получено, что в присутствии наполнителя существенно повышается энергия межмолекулярных связей. В результате моделирования трения скольжения молекулярных моделей выявлены различия в плотности молекул в области контакта с контртелом до и после сдвига, а также различия в величинах энергий межмолекулярного взаимодействия между контактирующими поверхностями в зависимости от времени сдвига. Сопоставление данных, полученных в результате моделирования молекулярных структур полимерной