

properties by means of nanoindentation // Mater. Res. 2001. Vol. 16, № 10. P. 2974–2982.

14. Swadener J.G., Taljat B., Pharr G.M. Measurement of residual stresses by load and depth sensing spherical indentation // Mater. Res. 2001. Vol. 16, № 7. P. 2091–2102.

15. Lee Y.H., Kwon D. Estimation of biaxial surface stress by instrumented indentation with sharp indenter // Acta Mater. 2004. Vol. 52, № 6. P. 1555–1563.

D.R. Salnikov<sup>1,2</sup>.

<sup>1</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

<sup>2</sup>STC «New technologies and materials»,

Saint Petersburg, Russia. danya2161@mail.com

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF RESIDUAL STRESSES IN METAL ON THE SHAPE OF THE IMPRINT AFTER NANOINDENTATION

### Abstract

The paper studied the effect of the influence of residual stresses on the shape of the imprint after nanoindentation was studied. Shafts made of 20X13 steel, the surface of which was subjected to running-in operation, were used as the material under study. In addition, the finite element method was applied. The results showed that the measurement of the print distortion after nanoindentation in stressed metal could be used as a method for determining residual stresses.

*Key words: residual stresses, indentation, imprint, finite element method*

УДК 620.199

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-244

Г.В. Цветкова, Г.В. Иванова, Э. Мохсени, М. Аль-Наджар, Я. Нагхави  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, tsvetkova\_gv@mail.ru

## МНОГОФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ ПОКРЫТИЙ

### Аннотация

Исследование направлено на изучение зависимости триботехнических характеристик материалов покрытий и полученных свойств от способа изготовления покрытий. В эксперименте на сталь 45 наносились слои различных материалов с помощью автоматической электродуговой наплавки, а также использовались лазерные технологии. Изучение триботехнических характеристик показало преимущества лазерных наплавок для лопаток газотурбинных двигателей. Для электродугowych наплавок рекомендуется использование наплавки с керамическим флюсом для повышения качества деталей смесителей. Металлографические исследования показали взаимосвязь между износостойкостью и микротвёрдостью, размером зерна в материале, суммой легирующих элементов.

*Ключевые слова:* наплавка, износостойкость, микротвёрдость, размер зерна, легирующие элементы.

### Введение

Нанесение специальных покрытий на поверхность трущихся

контактирующих деталей является одним из широко используемых методов получения нужных физико-механических свойств, что особенно важно сейчас в условиях ресурсосбережения, дефицита легирующих элементов и др. [1-4]. Материалы покрытия, обладающие оптимальными триботехническими свойствами, способствуют повышению эффективности работы механизмов, снижению энергопотребления и уменьшению необходимости в техническом обслуживании. При этом нужно учитывать, что, например, износостойкость материала покрытия не определяется полностью свойствами самого покрытия, а свойства покрытий не определяются их толщиной, химическим составом и структурой. Свойства рабочей поверхности многослойного покрытия также будут определяться свойствами подложки и величиной градиента свойств между покрытием и подложкой. Многофакторный анализ триботехнических характеристик материалов и покрытий выходит за рамки простого изучения отдельных свойств материалов, предполагает учет множества переменных, влияющих на триботехнические характеристики материалов и позволяет оценить поведение материалов в различных условиях эксплуатации.[5] Среди таких переменных могут быть свойства материалов (твердость, структура, фазовый и химический составы), особенности поверхностей контакта (шероховатость, смазка) и условия эксплуатации (нагрузка, скорость скольжения, температура) [4,5]. Этот подход позволяет получить более полное представление о взаимосвязи между различными параметрами и оптимизировать выбор материалов и покрытий для конкретных приложений. Основные методы многофакторного анализа триботехнических характеристик включают в себя экспериментальные и теоретические подходы. Экспериментальные методы включают проведение испытаний на специализированных трибологических стендах, позволяющих воспроизвести условия реальной эксплуатации и получить количественные данные о трении и износе. Теоретические подходы основаны на моделировании процессов трения и износа с использованием методов математического анализа и численного моделирования. Многофакторный анализ триботехнических характеристик материалов и покрытий в машиностроении позволяет оптимизировать выбор материалов для изготовления деталей и механизмов, увеличивая их срок службы и надежность, а также снизить эксплуатационные издержки и негативное воздействие на окружающую среду. [6, 7]

Целью данной работы является исследование влияния на триботехнические характеристики материалов покрытий таких факторов, как твердость, фазовый и химический состав, легирование, размер зерна.

### **Методы и материалы**

Материалы, использованные в исследовании: наплавочные слои материалов в количестве 5 штук наносились на основу из стали 45 методом автоматической электродуговой наплавки с лентой. В процессе наплавки используются флюсы - стандартный ФЦ-16 и керамический ФК-45. Наплавки стеллит и инконель, покрытые порошком железа, были получены с применением технологии лазерной наплавки. Для проведения металлографических исследований использовались цифровой микроскоп инвертированный IM 7000. Автоматический микротвердомер FM-300 и машина трения СМЦ-2 использовались для оценки микротвердости и износостойкости. [8, 9]

## Результаты и обсуждение

По структурно-фазовому составу исследуемых материалов можно сделать следующие выводы: в материале после электродуговой наплавки под флюсом ФЦ-16 присутствуют феррит и перлит с размером зерна 30 мкм, твердостью 12 HRC и микротвердостью 242 HV (см. рис. 1, 2). В материале электродуговой наплавки под флюсом ФК-45 обнаружены фазы мартенсит и аустенит, с размером зерна 9 мкм, твердостью 51 HRC и микротвердостью 800 HV. Для сравнения, в стали 45 микроструктура представляет собой феррит и перлит, размер зерна 234 мкм, твердость равна 29 HRC, микротвердость равна 308 HV. Было установлено, что твердость и микротвердость электродуговой наплавки под флюсом ФК-45 выше, чем у стали 45, а твердость и микротвердость наплавки под флюсом ФЦ-16 ниже, чем у стали 45.

По результатам триботехнических испытаний и анализа было установлено, что электродуговая наплавка, полученная под керамическим флюсом ФК-45 имеет более высокую относительную износостойкость  $\varepsilon=7$ . Наплавленный материал под флюсом ФЦ-16 имеет относительную износостойкость  $\varepsilon=3$ . Относительная износостойкость рассчитывалась по отношению к стали 45, как эталона с относительной износостойкостью равной 1. [10,11]

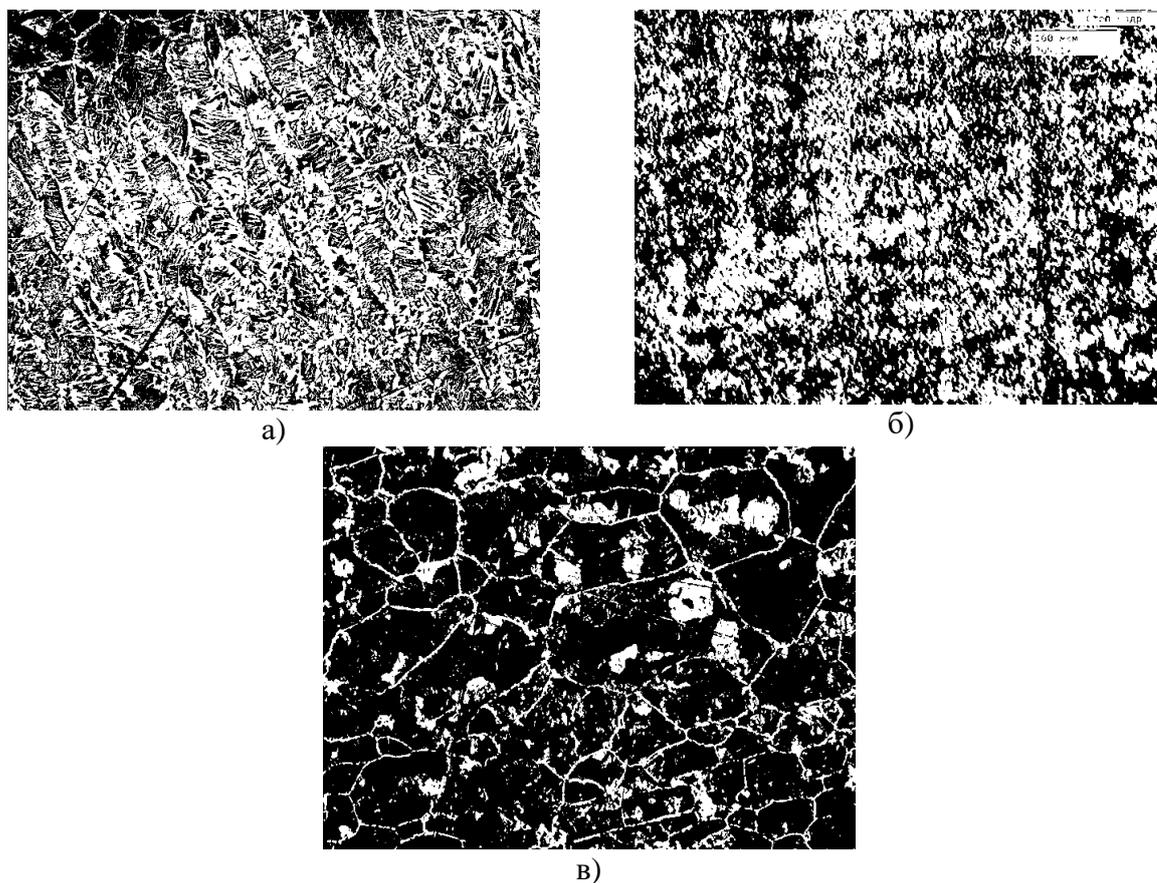


Рисунок 1 – Микроструктура материалов образцов: (а) микроструктура наплавки под флюсом ФЦ-16, (б) микроструктура наплавки под флюсом ФК-45, (в) микроструктура основы сталь 45

Преимущество по износостойкости наплавки с аустенитно-мартенситной мелкозернистой структурой определяется влиянием керамического флюса в наплавочном процессе, из-за чего получается выгодный фазовый состав наплавки. При сравнении распределения легирующих элементов по слоям наплавленных материалов под флюсами ФК-45 и ФЦ-16 и исходного состояния основного металла

стали 45, наблюдается в наплавке под флюсом ФК-45 повышенная концентрация легирующих элементов Si, Cr, Mn, что способствует образованию карбидов кремния и хрома, упрочнению, увеличению твердости и, соответственно, повышению износостойкости. [8, 9]

Исследование микротвердости наплавленных слоев сплавов инконель и стеллит позволило получить важные данные об их механических свойствах. Наплавка инконель имеет микротвердость на уровне 434 HV. Микротвердость наплавки стеллита составила 631 HV. Это свидетельствует о высокой твердости и прочности наплавленного слоя стеллита, что делает его перспективным материалом для применения в условиях повышенных нагрузок и агрессивных сред. Таким образом, полученные данные подчеркивают важность исследований микротвердости для оценки качества наплавленных слоев и выбора оптимальных материалов для конкретных инженерных задач (см. рис. 3 (а, б)).

По результатам металлографического исследования средний размер зерна в сплаве стеллит составил 3 мкм, что свидетельствует о мелкозернистой структуре, способствующей повышенной износостойкости. В сплаве инконель размер зерна 1 мкм. (см. рис. 3 (а, в)). Экспериментально полученные триботехнические характеристики материалов наплавки указывают на преимущества лазерных наплавки сплавов стеллит и инконель (с относительной износостойкостью,  $\varepsilon = 33$  и  $\varepsilon = 56$  соответственно). Эти результаты подтверждают возможность успешного применения данных материалов при изготовлении наиболее напряженных деталей тепловых двигателей. Однако, требуется оптимизация производственных процессов и разработка более экономичных методов получения, возможно расширение сферы применения данных наплавки в будущем (см. рис. 3 (б)).

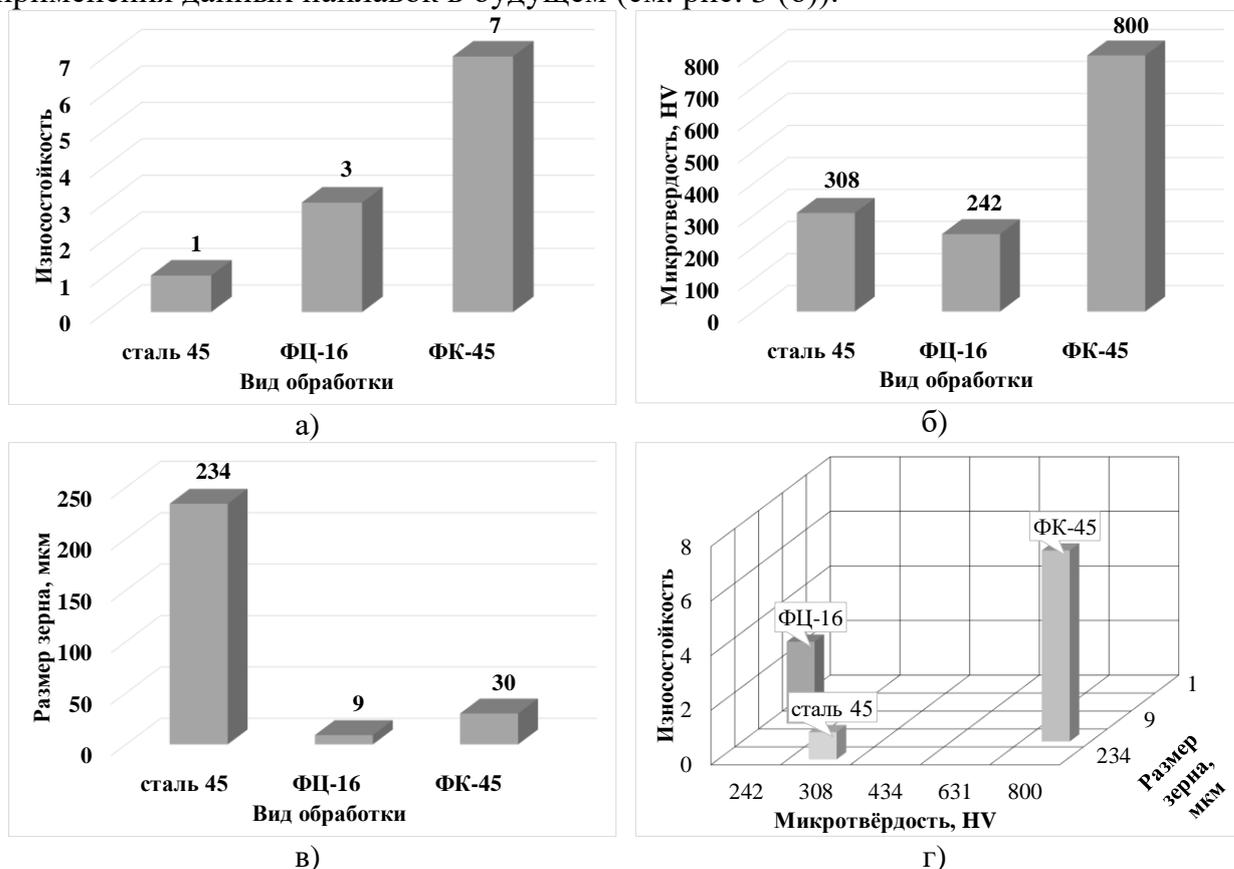


Рисунок 2 – Изменение для электродуговых наплавки (а) износостойкости, (б) микротвердости, (в) размера зерна в зависимости от вида обработки, (г) износостойкости, микротвердости и размера зерна

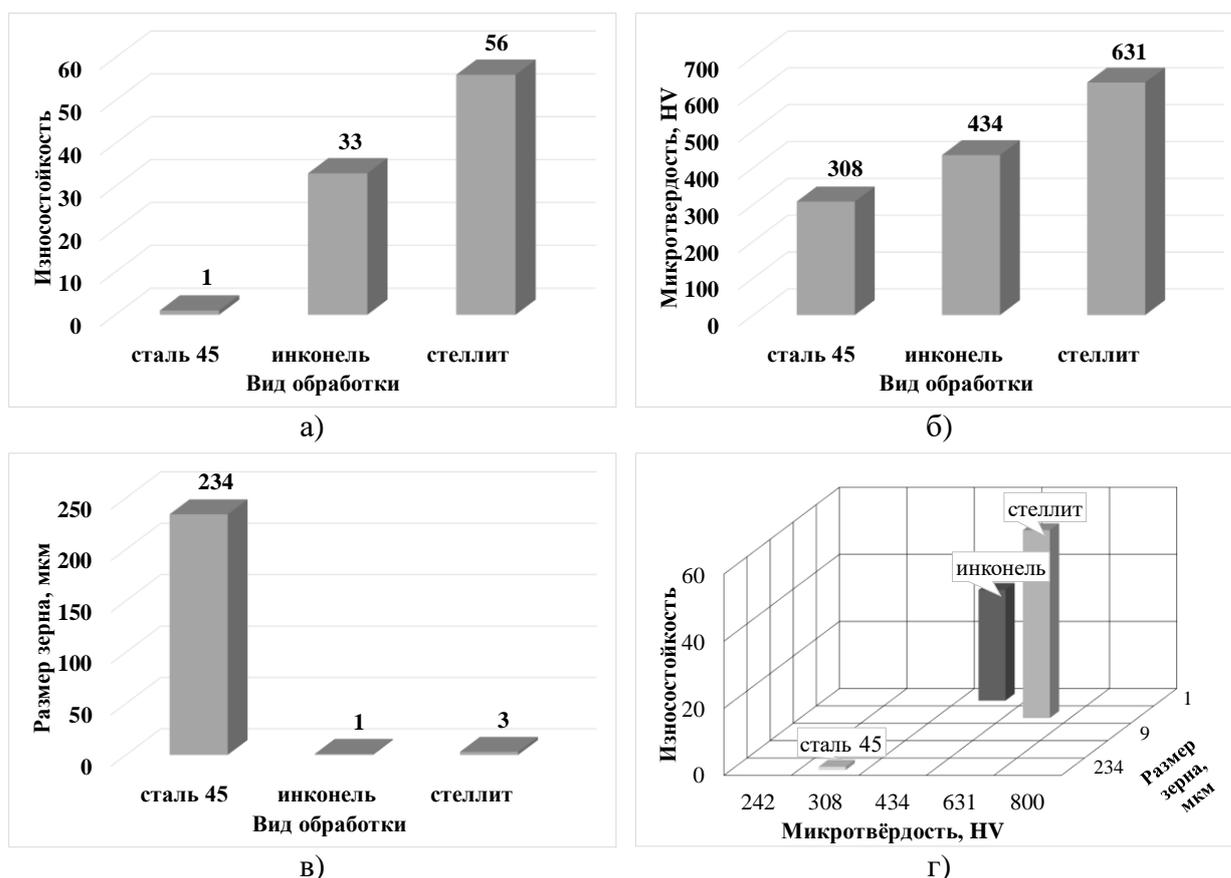


Рисунок 3 – Изменение (а) износостойкости, (б) микротвёрдости, (в) размера зерна для наплавки инконель и стеллит

### Заключение

Результаты исследования триботехнических характеристик материалов покрытий указывают на то, как важно учитывать влияние структурных особенностей материалов на их свойства. Металлографическое исследование показало, что размер зерна материалов наплавки имеет корреляцию с их износостойкостью. Корреляция между твердостью, микротвердостью и износостойкостью материалов подтверждает важность учета этих параметров при выборе материалов для конкретных приложений. Из проведенного металлографического исследования и анализа триботехнических свойств материалов электродугowych наплавки под флюсами можно сделать вывод, что наплавка с аустенитно-мартенситной структурой обладает более высокой твердостью и уменьшенным размером зерна, что влияет на улучшение триботехнических свойств и повышение износостойкости в условиях эксплуатации. [12]

Таким образом, на основании полученных результатов, можно рекомендовать использование электродуговой наплавки с керамическим флюсом ФК-45 для производства деталей смесителей, что способствует повышению качества и долговечности данного типа изделий.

Однако, применение сложных сплавов, таких как стеллит и инконель, ограничено их высокой стоимостью и сложностью обработки. Несмотря на высокую относительную износостойкость наплавки на сплавах инконель и стеллит, их применение ограничено из-за высоких затрат на производство и сложности технологического процесса. [13, 14] Это подчеркивает необходимость разработки

более эффективных и экономически выгодных методов получения износостойких покрытий. Таким образом, дальнейшие исследования в области триботехники и материаловедения должны быть направлены на разработку новых материалов и технологий, обеспечивающих оптимальное соотношение между техническими свойствами, стоимостью и производственной доступностью.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 368 с.
2. Тушинский Л.И. Методы исследования материалов. / Л.И. Тушинский, А.В. Плохов, А.О. Токарев, В.И. Синдеев. - М: Мир, 2004. - 384 с.
3. Лившиц Л.С., Гринберг Н.А., Куркумелли Э.Г. Основы легирования наплавочных металлов. М., Машиностроение, 1969.
4. Гаркунов Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
5. . Наноструктурные покрытия под ред. А. Кавалейро, Д. де Хоссен, перевод с англ. под ред. Р.А. Андриевского – М.: Техносфера, 2011. – 752 с.
6. Чичинадзе А.В. Трение, износ и смазка : (Трибология и триботехника) / А. В. Чичинадзе, Э. М. Берлинер, Э. Д. Браун и др.; Под общ. ред. А. В. Чичинадзе. - Москва : Машиностроение, 2003. - 575 с.
7. Марукович Е.И., Карпенко М.И. Износостойкие сплавы. – М.: Машиностроение, 2005. – 428с.
8. Г.В. Цветкова. Исследование триботехнических свойств покрытий на микроуровне. / Г.В.Цветкова, Я. Нагхави, Э. Мохсени, Г.В.Иванова. // Сборник: Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России. Научные труды Высшей школы машиностроения.т.2. 2023. С.82-86.
9. Г.В. Цветкова Зависимость триботехнических свойств материала наплавки от легирования / Цветкова Г.В., Скотникова М.А., Иванова Г.В., Нагхави Я., Аль-Наджар М.// Сборник: Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России. Научные труды Высшей школы машиностроения. Под редакцией А.А. Поповича. Санкт-Петербург, 2022. С. 106-110.
10. Скотникова, М.А. Особенности строения наплавочных материалов, предназначенных для рабочих лопаток смесителей. / М.А. Скотникова и др.// Металлообработка.- СПб.-2011.- № 1(61).-С. 37-42.
11. Цветкова, Г.В. Структурное и фазовое состояния наплавочных материалов, предназначенных для рабочих лопаток смесителей. / Цветкова, Г.В., Скотникова М.А., Белов Ю.М. и др.//Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование 4' 2010, Санкт-Петербург, С. 52-63.
12. Кулик, Е.А. Исследование триботехнических свойств поверхностного слоя биметаллов. / Е.А. Кулик, А.Д. Фернандо и др.// В книге: Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием. В 2-х частях.-Санкт-Петербург, 2020.- С.146-148.
13. Хоккинг М., Вассантари В., Сидки П. Металлические и керамические покрытия: Получение, свойства и применение: Пер. с англ. – М.: Мир, 2000. – 518 с.
14. Григорьянц, А.Г. Технологические процессы лазерной обработки: Учебное пособие для вузов / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюрин / Под ред. А.Г. Григорьянца–М.: изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2006.– 664 с.

G.V. Tsvetkova, G.V. Ivanova, E. Mohseni, M. Al-Najjar, Y. Naghawi  
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
Saint Petersburg, Russia, tsvetkova\_gv@mail.ru

## MULTIFACTOR ANALYSIS OF TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF COATING MATERIALS

### Abstract

The study is aimed at studying the dependence of the tribological characteristics of coating materials on the method of their manufacture and the resulting properties. In the experiment, layers of various materials were applied to 45 steel using automatic electric arc surfacing, and laser technologies were also used. A study of tribological characteristics has shown the advantages of laser surfacing for gas turbine engine blades. For electric arc surfacing, it is recommended to use surfacing with ceramic flux to improve the quality of faucet parts. Metallographic studies have shown a structural relationship between wear resistance and grain size in the material, as well as microhardness.

Key words: surfacing, wear resistance, microhardness, grain size, alloying elements.

УДК 678

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-245

А.Я. Башкарев, В.Ю. Бессонова  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия, bessonova.viktoria@yandex.ru

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОЛИАМИДНЫХ ПОКРЫТИЙ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ

### Аннотация

Обосновывается возможность применения термофлуктуационной теории прочности для прогнозирования долговечности антифрикционных полиамидных покрытий. Рассмотрены причины их разрушения в узлах трения. Предложен способ снижения отрицательного действия остаточных напряжений при нанесении полимеров на внутренние поверхности втулок.

*Ключевые слова:* узлы трения, полиамидные покрытия, металлическая подложка, адгезия

### Введение

Конструкционные полимерные материалы, обладая целым рядом технологических и потребительских преимуществ перед металлами, значительно уступают им по прочности. Отрицательным фактором, например, в узлах трения становится плохая теплопроводность, что приводит к их перегреву, при котором прочность полимеров значительно снижается. Одновременно из-за большого коэффициента теплового расширения происходит уменьшение или даже полное исчезновение необходимых для работы монтажных зазоров [1-4].

В свое время как выход из этого положения стало применение полимеров в виде тонкослойных покрытий, нанесенных на металлическую подложку.