

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДИСКОВ ФРИКЦИОННЫХ МУФТ

*Бреки А.Д., Иванова Г.В., Ли Цзе, Полонский В.Л., Тарасенко Е.А., Цветкова Г.В.*  
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург*

**Ключевые слова:** фрикционная муфта, фрикционные материалы, износостойкость, электродуговая наплавка, наплавочные покрытия.

**Аннотация.** Работа посвящена исследованию характеристик фрикционных муфт в зависимости от конструктивных параметров контактирующих поверхностей и способов повышения их износостойкости. Представлены результаты аналитических исследований, анализ параметров дисков МКЭ в программе Ansys в зависимости от материалов и формы, усилия прижатия дисков, результаты экспериментальных исследований по повышению износостойкости дисков методом электродуговой наплавки. По результатам экспериментальных исследований электродуговой наплавки для фрикционных дисков рекомендуется использовать многокомпонентные неметаллические и металлические спеченные материалы. Металлические спеченные материалы применять при тяжелых режимах трения, неметаллические материалы - при легких и средних режимах трения по температуре и нагрузке. Из неметаллических материалов наиболее работоспособным является ретинакс. Результаты исследований могут быть использованы в конструктивных решениях по проектированию и модернизации фрикционных муфт.

## INVESTIGATION OF THE WORKING SURFACES OF FRICTION CLUTCH DISCS

*Breki A.D., Ivanova G.V., Li Jie, Polonske V.L., Tarasenko E.A., Tsvetkova G.V.*  
*Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg*

**Keywords:** friction clutch, friction materials, wear resistance, arc surfacing, surfacing coatings.

**Abstract.** The work is devoted to the study of the characteristics of friction clutches depending on the design parameters of the contact surfaces and ways to improve their wear resistance. The results of analytical studies, the analysis of the parameters of the FEM disks in the Ansys program depending on the materials and shape, the pressing force of the disks, the results of experimental studies on increasing the wear resistance of disks by the method of electric arc surfacing are presented. According to the results of experimental studies of arc surfacing for friction discs, it is recommended to use multicomponent non-metallic and metallic sintered materials. Metallic sintered materials are used for heavy friction conditions, non-metallic materials - for light and medium friction conditions in terms of temperature and load. Of the non-metallic materials, retinax is the most efficient. The research results can be used in design solutions for the design and modernization of friction clutches.

### Введение

Надежность и долговечность работы устройств, использующих передачу крутящего момента от ведущего к ведомому валу за счет трения, зависят от состояния контактных рабочих поверхностей, а в условиях интенсификации нагрузок и скоростей проблемы снижения износа встают особенно остро. В связи с этим, исследование механизма процесса изнашивания и снижение износа рабочих поверхностей является актуальной задачей.

Включение фрикционной муфты осуществляется при любых различных скоростных режимах, при этом зацепление относительно стабильно, вибрация и удары невелики, а поверхность трения скользит при перегрузке, что предотвращает повреждение деталей, но относительное скольжение фрикционной пластины приводит к ее износу, сокращая срок службы муфты [1, 2]. Исследования процесса изнашивания приведены в работах авторов [3, 4].

Работа посвящена исследованию характеристик фрикционных муфт в зависимости от конструктивных параметров контактирующих поверхностей и методов повышения их износостойкости.

### Материалы и методы исследований

Использовались аналитические методы исследования МКЭ в программе Ansys, метод

электродуговой наплавки, выполнены лабораторные исследования по определению микротвердости и структуры стали и наплавов.

Материал стального диска Сталь 45, на который наносились 5 наплавочных слоев разных химических составов системы Fe, C, Cr, Mo, Nb, Si, Mn, Nb, В. Фрикционные материалы, выбранные для исследования: металлокерамика, Сч35, асбест, ретинакс А, ретинакс Б.

### Результаты

На рисунке 1 показана схема муфты, для которой были выполнены расчеты по определению зависимости усилия прижатия и давления от коэффициента трения различных материалов (рис. 2) по методике [5]. Исходных данные для расчета представлены в таблицах 1, 2.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что условие износостойкости выполнено, а при использовании материалов с большим коэффициентом трения требуется меньшее значения усилия сжатия дисков для передачи вращающего момента, передаваемого муфтой. Наименьшее значение усилия 500 Н и наименьшее давление 0,11 МПа соответствует фрикционной паре «металлокерамика по стали» без смазки, наибольшее значение силы 3214Н и давления 0,76 МПа – для сочетания материалов «закалённая сталь по закалённой стали» со смазкой. Для заданных условий работы условие проверки износостойкости выполняется все всех сочетаний фрикционных пар. Для пары «чугун по чугуну или по закаленной стали» без смазки расчетное давление составляет 0,299 МПа при величине допускаемого давления 0,2-0,3 МПа.

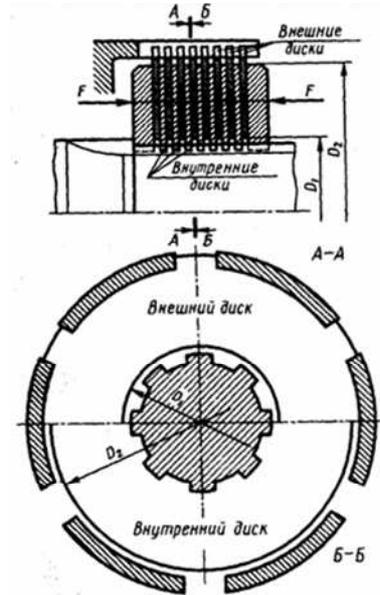


Рис. 1. Схема фрикционной многодисковой муфты

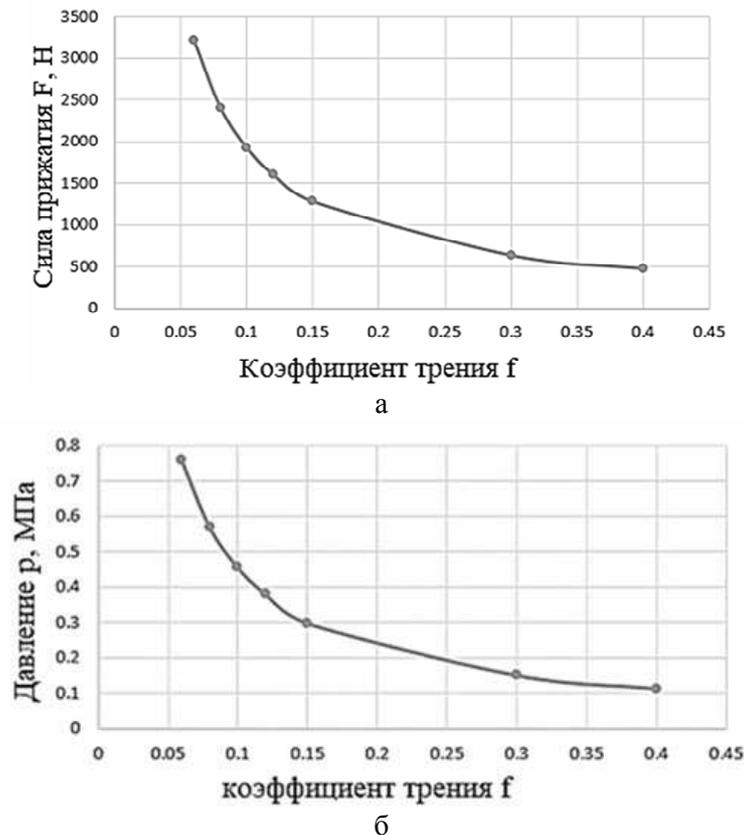


Рис. 2. Результаты расчета: а – усилия прижатия; б – давления от коэффициента трения

Табл. 1. Исходные данные для расчета

Мощность Р, кВт	Угловая скорость, рад/с	Число дисков / Диаметры дисков, мм		Коэффициент работы муфты при переменной нагрузке, К	Коэффициент запаса сцепления, k
		Ведущих $D_1$	Ведомых $D_2$		
3,5	50	9/110	10/82	1,7	1,4

Табл. 2. Коэффициенты трения и допускаемые контактные давления для фрикционных муфт

Материал фрикционной пары	Коэффициент трения, $f$	Допускаемое давление $p$ , МПа
Со смазкой		
Закалённая сталь по закалённой стали	0,06	0,6 – 0,8
Чугун по чугуну или по закалённой стали	0,08	0,6 – 0,8
Текстолит по стали	0,12	0,4 – 0,6
Металлокерамика по стали	0,1	0,8
Без смазки		
Асбест по стали и чугуну	0,3	0,2 – 0,3
Металлокерамика по стали	0,4	0,3
Ретинакс А по закалённой стали	0,25	0,08-0,1
Чугун по чугуну или по закалённой стали	0,15	0,2 – 0,3

В работе выполнен расчет характеристик дисков от усилия прижатия, их формы и фрикционных материалов в программе Ansys [6, 7].

Кинетическая энергия передается за счет трения между ведомым диском фрикционной муфты и активным диском. Фрикционная пластина сцепления установлена на ведомом диске, а нажимная пластина сцепления установлена на активной части. При работе нажимная пластина создает трение с фрикционной пластиной для управления работой ведомого диска сцепления. В работе проведены результаты исследования по определению эквивалентных напряжений, возникающих в процессе контакта и вращения дисков с одинаковой угловой скоростью и перемещения точки на среднем радиусе диска.

Для анализа методом конечных элементов форма фрикционной пластины представлена в виде кольца. Наружный диаметр ведомого диска и активного дисков составляет 110 мм, внутренний диаметр – 82 мм, толщина – 3,5 мм, скорость вращения 50 рад/с. Характеристики материалов показаны таблица 3.

Конечно-элементная модель диска, граничные условия, форма поверхности диска, схема к расчету перемещения точки и пример результатов расчета представлены на рисунке 3.

Для заданных условий определены эквивалентные напряжения для фрикционной пары «сталь 45 – металлокерамика», «сталь 45 – чугун», «сталь 45 – асбест». В результате сравнительного анализа установлено, что величина напряжений распределение напряжений фрикционных материалов на основе асбеста не такое равномерное, как у металлокерамики и чугуна.

Табл. 3. Характеристики материалов дисков

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль упругости E, МПа	Коэффициент Пуассона $\mu$
Сталь 45	7890	200	0,269
Металлокерамика	7000	120	0,3
Чугун	7350	120	0,25
Материалы на основе асбеста	2000	190	0,287

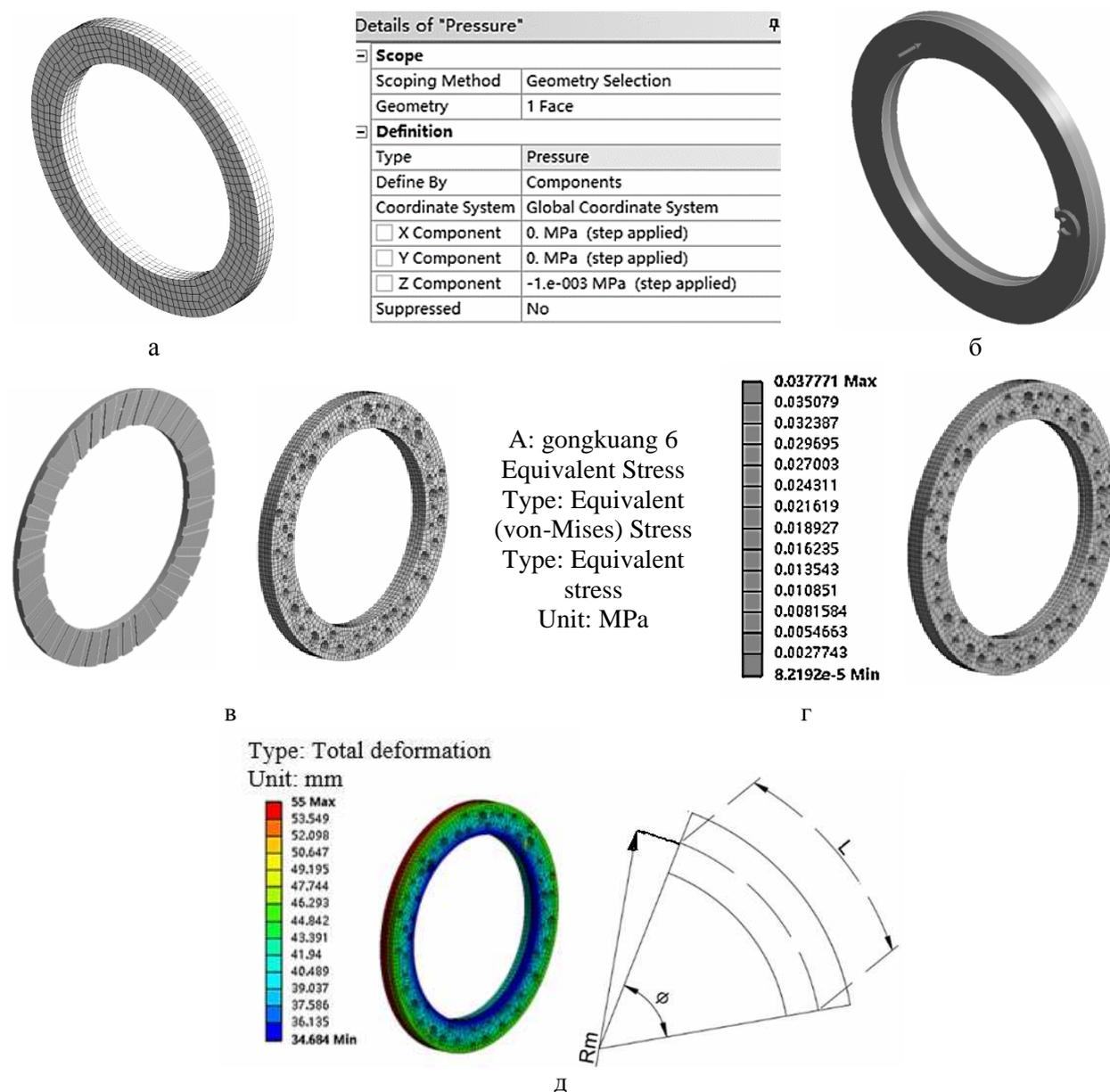


Рис. 3. Анализ МКЭ: а) конечно-элементная модель диска; б) граничные условия; в) формы дисков; г) результаты расчета эквивалентных напряжений; д) схема и результаты расчета перемещения

При увеличении и уменьшении усилия прижатия в 2 раза для пары «сталь 45 – металлокерамика» анализ полученных данных показал, что чем больше сила, тем величина напряжений и скорость отклика фрикционного диска выше, а для достижения совместного вращения требуется меньше времени.

Конечно-элементный анализ напряжений при изменении формы диска (диск сплошной; в диске выполнены отверстия; в диске выполнены канавки) позволил установить, что наличие отверстий во фрикционном диске или радиальных канавок уменьшает площадь трения контакта, тем самым изменяя величину напряжения между двумя дисками.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что для всех вариантов материалов и формы дисков эквивалентные напряжения возрастают до 0,03 МПа с момента начала процесса, достигают максимального значения, затем снижаются до 0,01 МПа и становятся практически постоянными по величине, а при увеличении усилия нажатия скорость отклика фрикционного диска выше и для достижения совместного вращения требуется меньше времени.

При изготовлении фрикционных муфт традиционно предусматривается два типа дисков – стальной диск с антикоррозионным износостойким покрытием и фрикционный диск. В

исследованиях авторов [8] в качестве покрытия на стальной диск было предложено применение электродуговой наплавки. Электродуговая наплавка является наиболее широко распространенным способом в машиностроении и в других отраслях производства. Отличительная особенность электродуговой наплавки – возможность нанесения износостойких покрытий на детали любой формы (цилиндрической, фасонной, плоской) в любых пространственных положениях с широким диапазоном свойств наплавленного металла, простота механизации и автоматизации технологического процесса (в значительной мере реализованная в настоящее время), а также доступность наплавочных материалов различных типов.

Наплавочным материалом может быть, как материал упрочняемой детали, так и иной с более высокими механическими и физико-химическими характеристиками. Развитие этого метода упрочнения сводится к поиску более износостойких материалов, чем материал упрочняемой детали. В роли наплавочных материалов обычно используют легированную сталь. Главные факторы, регламентирующие износостойкость: химический состав наплавленного материала, возможность последующего дополнительного упрочнения, структурная устойчивость наплавленного слоя в условиях температурного воздействия при изнашивании.

В результате исследований наплавленного покрытия авторами [9, 10] (на основу из стали 45 наносились 5 наплавочных слоев разных химических составов системы Fe, C, Cr, Mo, Nb, Si, Mn, Nb, B) было получено, что максимальной износостойкостью обладает наплавка с мелкими зёрнами диаметром 10-15 мкм, с твёрдой мартенситной структурой, упрочнённой дисперсными карбидами и окантованные мягкой аустенитной оторочкой (рис. 3). При этом высокопрочные карбиды и бориды хрома, ниобия и ванадия располагались в мягкой оторочке и не выкрашивались. Установлено, что оптимальное структурно-фазовое состояние наплавочных материалов достигается при содержании в наплавочном материале аустенита 35-40%, мартенсита 30-40% и упрочняющих фаз 25-30%. Это обеспечивало закрепление максимального количества частиц упрочняющих фаз и достижение максимальной относительной износостойкости  $\epsilon = 5,89$  и твёрдости HRC 61 наплавочных материалов.

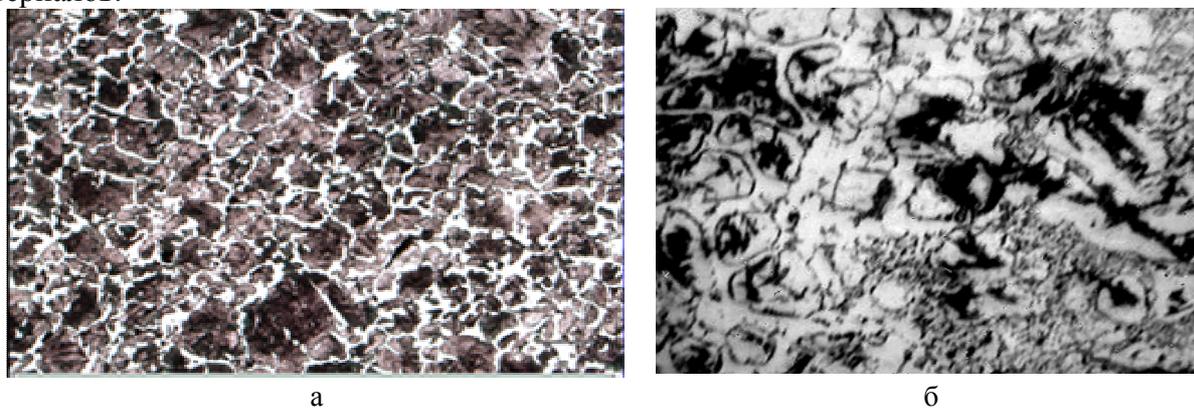


Рис. 3. Микроструктура: а) стали 45(основа), б) наплавка

### Выводы

Результаты исследования по определению эквивалентных напряжений и величины смещения дисков показали, что распределение напряжений фрикционных материалов на основе асбеста неравномерно и влияние трех материалов на смещение незначительно; величина усилия прижатия значительно влияет на изменения напряжения и смещения; отверстия и канавки на поверхности трения не оказывают существенного влияния на напряжение и смещение.

По результатам экспериментальных исследований электродуговой наплавки для фрикционных дисков рекомендуется использовать многокомпонентные неметаллические и металлические спеченные материалы. Металлические спеченные материалы применять при

тяжелых режимах трения, неметаллические материалы – при легких и средних режимах трения по температуре и нагрузке. Из неметаллических материалов наиболее работоспособным является ретинакс.

### **Заключение**

Полученные результаты могут быть использованы при выборе и обосновании параметров фрикционной муфты, в конструктивных решениях по модернизации муфт, направленных на повышение износостойкости их рабочих поверхностей.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда по приоритетному направлению деятельности Российского научного фонда «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами» научного проекта: "Применение цифрового моделирования и больших данных для повышения эффективности механической обработки титановых лопаток паровых турбин и их эксплуатации в условиях каплеударной эрозии № 22-19-00178.

### **Список литературы**

1. Иванов М.Н., Финогенов В.А. Детали машин: учебник для академического бакалавриата, для вузов. – 15-е изд., испр. и доп. – М.: Юрайт, 2016. – 408 с.
2. Кукаленко Б.Д., Заборский Е.В. Детали машин и основы конструирования. Муфты приводов. Конструкции и расчет соединительных муфт [Электронный ресурс]: учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – URL: <http://elibr.spbstu.ru/dl/2/s16-87.pdf>.
3. Кулаев В.Е., Орлянский А.В., Яковлева Л.И., Калугин Д.С.; под ред. В.Е. Кулаева. Муфта механические для соединения валов, конструкция и основные принципы проверочных расчетов на прочность: Учеб. пособие. – Ставрополь. 2014. – 46с.
4. Полышкин Н.Г. Основы теории трения, износа и смазки: Учеб. пособие. – Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2013. – 192 с.
5. Малашенко В.С., Ласица П.В., Илькевич А.В., Оскирко А.И. Фрикционные многодисковые муфты [Электронный ресурс]. – БГАТУ, 2020. – URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/347182151.pdf>.
6. Огородникова О.М. Конструкционный анализ в среде Ansys: Учебное пособие. – Екатеринбург: Уральский государственный технический университет – УПИ, 2004. – 104с.
7. Елисеев К.В., Зиновьева Т.В. Вычислительный практикум в современных САЕ-системах: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 150300 «Прикладная механика». – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – URL: <http://elibr.spbstu.ru/dl/2/si20-702.pdf>. – DOI: 10.18720/SPBPU/2/si20-702.
8. Skotnikova M.A., Belov Y.M., Sokiryanskii L.F., Tsvetkova G.V., Sidorova V.Y. Mechanical properties and structure of deposited wear-resistant metal // Metal Science and Heat Treatment. 1994, vol. 36(8), pp. 421-425.
9. Скотникова М.А., Цветкова Г.В., Иванова Г.В. Основы теории трения. Основные характеристики поверхности трения: учебное пособие. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. – URL: <http://elibr.spbstu.ru/dl/2/i20-62.pdf>. – DOI: 10.18720/SPBPU/2/i20-62.
10. Скотникова М.А., Шашерина С.А., Паитова О.В., Цветкова Г.В. Триботехнические свойства наноструктурированных медно-никелевых покрытий // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2018. – №7. – С. 370-382.

### **References**

1. Ivanov M.N., Finogenov V.A. Machine parts: a textbook for academic baccalaureate, for higher education institutions. – 15th ed., corrected and additional. – M.: Yurayt, 2016. – 408 p.
2. Kukalenko B.D., Zaborsky E.V. Machine parts and design basics. Drive couplings. Designs and calculation of couplings [Electronic resource]: textbook. – SPb.: Publ. house of Politekhn. un-ty, 2016. – URL: <http://elibr.spbstu.ru/dl/2/s16-87.pdf>.
3. Kulaev V.E., Orlyansky A.V., Yakovleva L.I., Kalugin D.S.; ed. V.E. Kulaev. Mechanical coupling for connecting shafts, design and basic principles of strength verification calculations: Proc. allowance. – Stavropol. 2014. – 46s.
4. Polyushkin N.G. Fundamentals of the theory of friction, wear and lubrication: Proc. allowance. – Krasnoyarsk: Krasnoyarsk state agrarian un-ty, 2013. – 192 p.
5. Malashenko V.S., Lasitsa P.V., Ilkevich A.V., Oskirko A.I. Friction multi-plate clutches [Electronic resource]. – BGATU, 2020. – URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/347182151.pdf>.
6. Ogorodnikova O.M. Structural analysis in the Ansys environment: Textbook. – Yekaterinburg: Ural State Technical University – UPI, 2004. – 104p.

7. Eliseev K.V., Zinovieva T.V. Computing practical work in modern CAE-systems: a textbook for students of higher educational institutions studying in the direction of training 150300 "Applied Mechanics". – SPb.: Publ. house of Politekhn. un-ty, 2008. – URL: <http://elib.spbstu.ru/dl/2/si20-702.pdf>. – DOI: 10.18720/SPBPU/2/si20-702.
8. Skotnikova M.A., Belov Y.M., Sokiryanskii L.F., Tsvetkova G.V., Sidorova V.Y. Mechanical properties and structure of deposited wear-resistant metal // Metal Science and Heat Treatment. 1994, vol. 36(8), pp. 421-425.
9. Skotnikova M.A., Tsvetkova G.V., Ivanova G.V. Fundamentals of Friction Theory. The main characteristics of the friction surface: textbook. – SPb: POLYTECH-PRESS, 2020. – URL: <http://elib.spbstu.ru/dl/2/i20-62.pdf>. – DOI: 10.18720/SPBPU/2/i20-62.
10. Skotnikova M.A., Shasherina S.A., Paitova O.V., Tsvetkova G.V. Tribological properties of nanostructured copper-nickel coatings // Modern engineering. Science and education. 2018, no. 7, pp. 370-382.

<i>Сведения об авторах:</i>	<i>Information about authors:</i>
<b>Бреки Александр Джалюльевич</b> – доктор технических наук, профессор Высшей школы машиностроения Института машиностроения, материалов и транспорта	<b>Breki Aleksandr Dzhaljulevich</b> – doctor of technical sciences, professor of the Higher School of mechanical engineering, Institute of mechanical engineering, materials and transport
<b>Иванова Галина Валерьевна</b> – старший преподаватель Высшей школы машиностроения Института машиностроения, материалов и транспорта», старший научный сотрудник международного научно-образовательного центра «BaltTribo-Polytechnic»	<b>Ivanova Galina Valeryevna</b> – senior lecturer at the Higher School of mechanical engineering, Institute of mechanical engineering, materials and transport, senior researcher at the international scientific and educational center "BaltTribo-Polytechnic"
<b>Ли Цзе</b> – магистрант	<b>Li Jie</b> – master's student
<b>Полонский Владимир Львович</b> – кандидат технических наук, доцент Высшей школы машиностроения Института машиностроения, материалов и транспорта	<b>Polonsky Vladimir Lvovich</b> – candidate of technical sciences, associate professor of the Higher School of mechanical engineering, institute of mechanical engineering, materials and transport
<b>Тарасенко Елена Александровна</b> – кандидат технических наук, доцент Высшей школы машиностроения Института машиностроения, материалов и транспорта	<b>Tarasenko Elena Aleksandrovna</b> – candidate of technical sciences, associate professor of the Higher School of mechanical engineering, Institute of mechanical engineering, materials and transport
<b>Цветкова Галина Викторовна</b> – кандидат технических наук, доцент Высшей школы машиностроения Института машиностроения, материалов и транспорта	<b>Tsvetkova Galina Viktorovna</b> – candidate of technical sciences, associate professor of the Higher School of mechanical engineering, Institute of mechanical engineering, materials and transport
taraselen@mail.ru	

Получена 28.11.2022