

УПРАВЛЕНИЕ ФРИКЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ ПОЛИАМИДНЫХ ПОКРЫТИЙ В СОЕДИНЕНИЯХ С НАТЯГОМ

A.V. Kushchenko, Al.Ya. Bashkarev

MANAGEMENT FRICTIONAL PROPERTIES OF POLYMER COATINGS IN CONNECTIONS WITH A TIGHTNESS

Соединения с натягом используются для передачи крутящих моментов и осевых нагрузок за счет сил трения, которые возникают на контактирующих поверхностях вследствие их упругой деформации, создаваемой натягом при сборке. Во время эксплуатации соединения из стальных деталей подвергаются разрушению из-за фреттинг-коррозии в результате действия переменных нагрузок, характерных для многих видов техники. Одним из способов борьбы с этим явлением может стать применение тонкослойных полимерных покрытий. В работе изложены результаты исследований прочности адгезии и коэффициента трения покоя тонкослойного полиамидного покрытия и композитов на основе полиамидов по стали. Установлено, что наилучшие фрикционные и адгезионные свойства имеет полиамидный композит с добавлением 20–40 % массовой доли железного сурика. Его коэффициент трения покоя по стали сопоставим с коэффициентом трения покоя стали по стали, а адгезия к стальной поверхности на отрыв больше на 40 %, чем у покрытия из чистого полиамида.

СОЕДИНЕНИЯ С НАТЯГОМ; ПОЛИАМИДНЫЕ ПОКРЫТИЯ; АДГЕЗИЯ; КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ ПОКОЯ; ФРЕТТИНГ-КОРРОЗИЯ.

Compounds with interference are used for transmitting torque and axial loads due to friction forces arising on their surfaces through elastic deformation during assembly. During operation, the connections made of steel parts are destroyed as a result of fretting-corrosion due to the action of variable loads, typical for many types of equipment. One way to combat this phenomenon may be the use of thin-layer polymer coatings. The present work discusses the results of studying the adhesion strength and coefficient of friction of polyamide thin-layer coatings and composites based on polyamides on steel. We found that a composite containing from 20 to 40% mass fraction of iron oxide has the best friction and adhesive properties. Its coefficient of static friction on steel is comparable with the coefficient of static friction steel on steel, and adhesion to steel surface is more 40% higher than coatings of pure polyamide.

CONNECTION WITH INTERFERENCE; POLYMERIC COATINGS; ADHESION; COEFFICIENT OF FRICTION; FRETTING-CORROSION.

Введение

Известно, что сопряжения с натягом используются для передачи крутящих моментов и осевых сил без дополнительного крепления. Неподвижность деталей относительно друг друга обеспечивается силами трения, которые возникают на контактирующих поверхностях вследствие их упругой деформации, создаваемой натягом при сборке соединения.

Неразборные соединения с натягом просты и технологичны в изготовлении, рассчитаны на продолжительный срок службы. Но известно [1–3], что разрушение таких соединений из стальных деталей может произойти раньше, чем будет исчерпан ресурс изделия, из-за фреттинг-коррозии, которая развивается под действием переменных нагрузок, типичных для многих машин. Одним из перспективных методов как для защиты от фреттинг-коррозии соединений с на-

тягом, так и для восстановления поврежденных соединений может быть использовано применение полимерных материалов, в частности полиамидов.

Ранее предполагалось, что при использовании полимеров в соединениях с натягом в результате релаксационных явлений может произойти исчезновение натяга. Однако у некоторых из полимеров, например полиамидов, которые относятся к группе эластомеров, коэффициент Пуассона практически равен 0,5, то есть, другими словами, с точки зрения классической теории упругости они – практически несжимаемый материал. На самом деле эти полимеры достаточно легко деформируются за счет пластических деформаций, происходящих без изменения объема. Если деформация, значит, она происходит без возможности перемещения материала, т.е. пластических сдвигов, то, может происходить только благодаря изменению межмолекулярных расстояний, что требует значительных усилий, соизмеримых с усилиями деформации металлических надмолекулярных структур. При этом такую деформацию можно считать почти идеально упругой.

Исходя из этого можно говорить о возможности применения тонкослойных покрытий из полиамидов или композитов на их основе как для защиты от фреттинг-коррозии новых соединений с натягом, так и для восстановления разрушенных соединений. Объектом исследований выбрана новая конструкция соединений с натягом, в которой применены тонкослойные покрытия из

полиамида или композитов на его основе (рис. 1) для повышения долговечности и ремонтпригодности узлов машин (в частности, вала).

Целью нашей работы было экспериментальное изучение фрикционных характеристик тонкослойных (0,1–0,5 мм) полимерных покрытий из различных видов полиамидов и поиск путей повышения их коэффициента трения покоя по стали.

Методика и материалы

Известно [4–6], что полиамиды широко используются в узлах трения машин как антифрикционные материалы, так как обладают достаточно низким коэффициентом трения скольжения и достаточно высокими нагрузочными возможностями [7, 8]. Однако опыта применения тонкослойных полиамидных покрытий в соединениях с натягом пока еще не было, а традиционные методы повышения фрикционных характеристик путем добавления в полиамид металлической стружки, асбеста и т.п. [6] в данном случае не применимы из-за технологических особенностей нанесения тонкослойных покрытий.

Для оценки фрикционных свойств тонкослойных полиамидных покрытий были проведены измерения их коэффициента трения покоя по стали в зависимости от давления в зоне трения. В экспериментах использовались покрытия толщиной от 0,065 до 0,53 мм из полиамидов ПА-6, ПА-6/66, ПА-68.

Измерение величины коэффициента трения покоя выполнялось на испытательной машине ИР 5047-50-11. Для этого были изготовлены образцы с нанесенным полиамидным покрытием, которые нагружались через стальные пластины усилием, позволяющим создавать в зоне трения давление до 30 МПа. Образцы вместе с нагрузителем фиксировались в traversе испытательной машины, к ним прикладывалась нарастающая нагрузка вплоть до начала скольжения стальных пластин по полимерному покрытию. Компьютером фиксировалась диаграмма нагружения.

Экспериментальные результаты

Из результатов экспериментов следует, что коэффициент трения покоя полиамидного покрытия по стали не является постоянной вели-

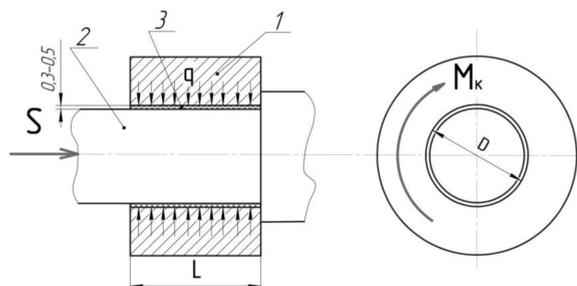


Рис. 1. Схема применения полиамидного покрытия при создании соединения с натягом: 1 – втулка; 2 – вал; 3 – тонкослойное полиамидное покрытие вала; S – осевая нагрузка; M_k – внешний крутящий момент; q – радиальное давление в зоне сопряжения; D – номинальный посадочный диаметр; L – длина сочленения

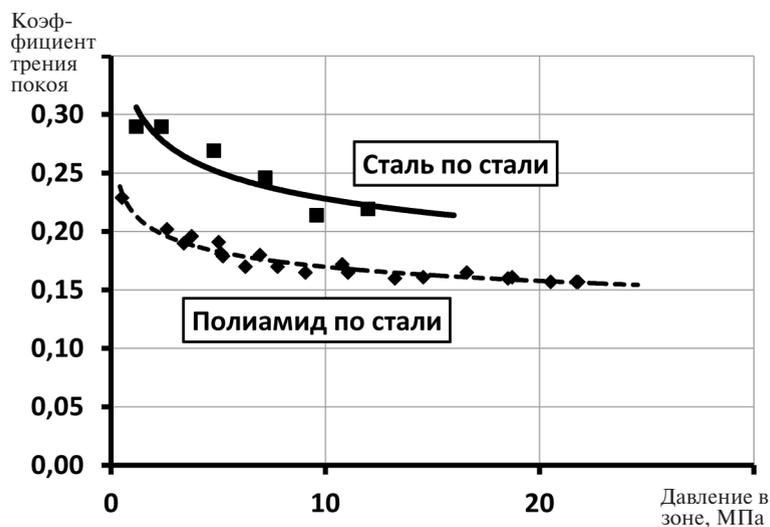


Рис. 2. Коэффициенты трения покоя полиамида по стали и стали по стали

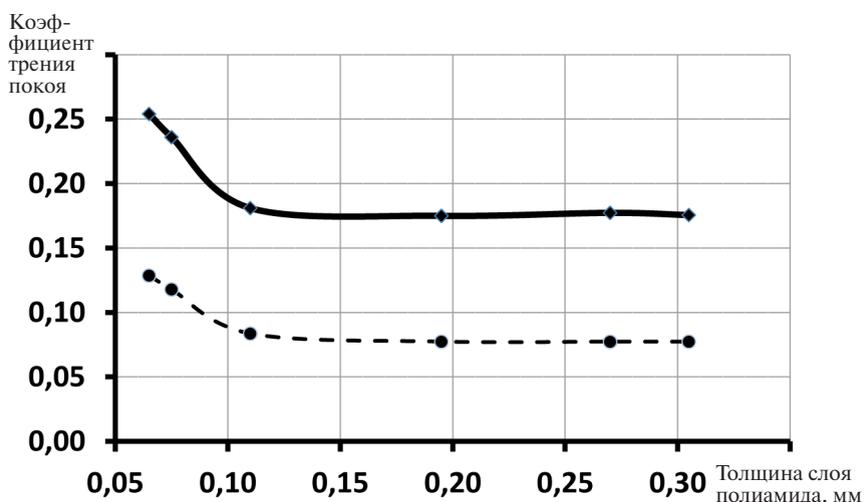


Рис. 3. Изменение величины коэффициента трения покоя полиамида по стали в зависимости от толщины слоя (сплошная линия — при давлении в зоне трения в 1 МПа, пунктирная — при 30 МПа)

чиной, а уменьшается с ростом давления; при этом он ниже на 30–40 %, чем для пары «сталь–сталь» (рис. 2).

В результате экспериментов установлено также, что коэффициент трения покоя полиамида по стали зависит не только от давления в зоне трения, но и от толщины слоя полиамида. При уменьшении толщины покрытия от 0,12 до 0,065 мм во всем диапазоне давлений от 1 до 30 МПа наблюдается рост коэффициента трения покоя

(например, от 0,17 до 0,25 при давлении в зоне трения 1 МПа и от 0,08 до 0,14 — при 30 МПа). При толщинах покрытия более 0,12 мм коэффициент трения покоя полиамида по стали постоянен (рис. 3).

Более низкий коэффициент трения покоя полиамида по стали, чем у пары «сталь–сталь», свидетельствует о том, что при использовании тонкослойных полимерных покрытий в соединениях с натягом необходимо найти способ по-

вышения коэффициента трения покоя полимера по стали за счет применения различных присадок, т.е. созданием композитных смесей.

Использование полиамидных покрытий и композитов на их основе в соединениях с натягом может быть ограничено недостаточной адгезией полиамидного слоя к стальной подложке. Поэтому были проведены исследования величины адгезии, т.е. предела прочности связи покрытия со сталью по нормальным напряжениям. Исследованиям адгезии полимеров к стали посвящено большое количество работ [11, 12, 15–17]. Однако они проводились для случаев работы полимерных подшипников скольжения, а не для покрытий в соединениях с натягом.

Исследование адгезии проводилось известным методом отрыва стального штифта от наплавленной полимерной композиции [8]. Схема нагружения и общий вид образцов для испытаний представлены на рис. 4. Образцы представляют собой стержень 1, заканчивающийся штифтом диаметром 3 мм. На штифт по скользящей посадке насажен диск 2. Поверхность диска и торец штифта совпадают. На поверхность диска наплавляется полимер или композит на его основе. Для уменьшения трения между штифтом и отверстием диска штифт смазывался графитовой смазкой.

Измерение величины напряжения отрыва торца штифта от полимера выполнялось на ис-

пытательной машине ИР 5047-50-11. Для этого диск образца фиксировался в зажиме траверсы машины, а к стержню образца прикладывалось нарастающее усилие вплоть до отрыва штифта от полимера. При этом компьютером фиксировалась диаграмма нагружения.

Применительно к условиям работы полиамидных покрытий в соединениях с натягом были исследованы адгезионные свойства к стали чистого полиамида и его композиций со свинцовым и железным суриком и стеклянным порошком.

Из результатов экспериментов (рис. 5) следует:

величина адгезии на отрыв для покрытия из чистого полиамида составляет около 35 МПа;

до значений массового содержания свинцового сурика в 20 % величина адгезии этого композита к стали практически не меняется и может быть принята равной 35 МПа, а при большем содержании резко снижается;

до значений массового содержания стеклянного порошка в 15 % величина адгезии этого композита к стали увеличивается примерно на 20 % (до 40 МПа), а при большем содержании снижается;

до значений массового содержания железного сурика в 30 % величина адгезии этого композита к стали увеличивается примерно на 60 % (до 50 МПа), а при большем содержании снижается.

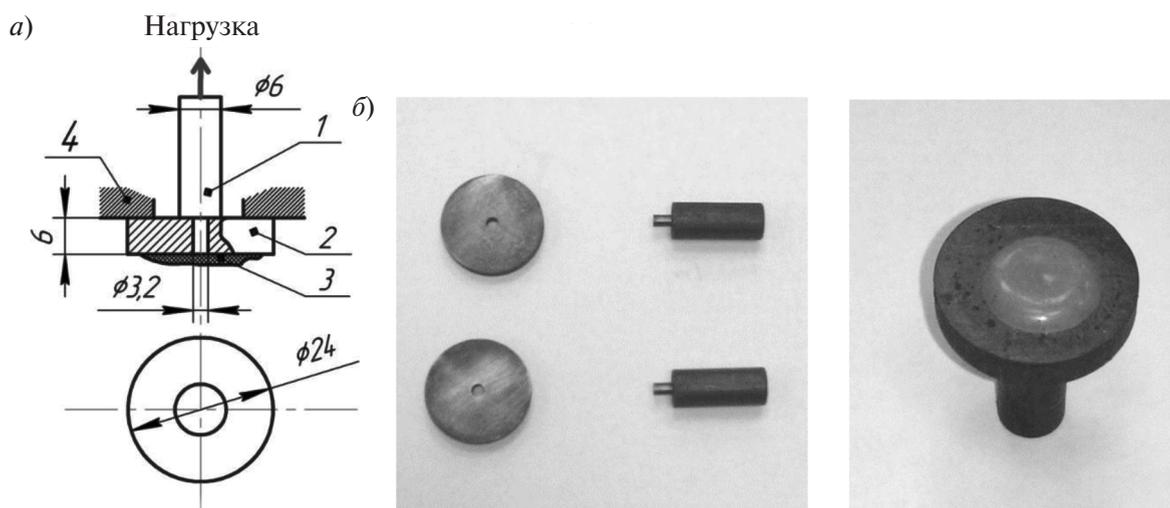


Рис. 4. Схема нагружения (а) и общий вид (б) образцов для определения величины адгезии: 1 – стержень; 2 – диск; 3 – полимерное покрытие; 4 – упор

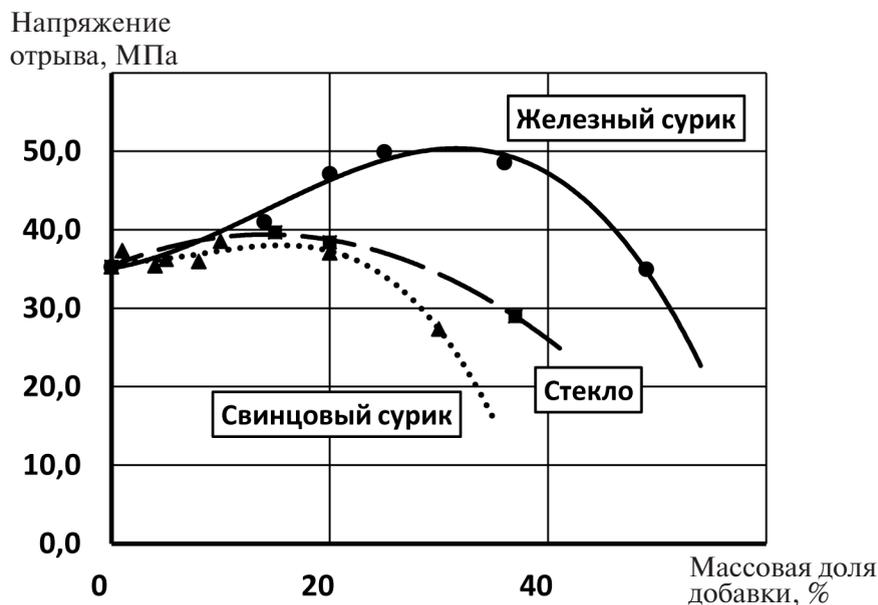


Рис. 5. Изменение адгезионных характеристик композитов на основе полиамида в зависимости от вида и массовой доли добавок

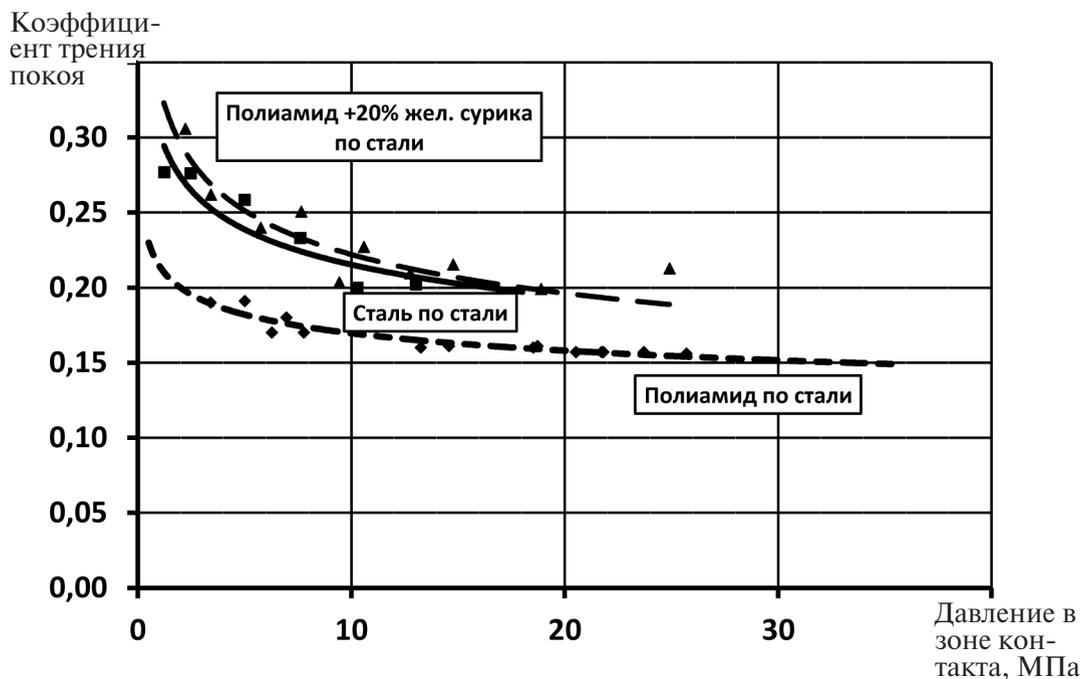


Рис. 6. Изменение коэффициента трения покоя композита из полиамида и 20 % железного сурика по стали в зависимости от давления в зоне контакта

Измерение величины коэффициента трения покоя композита на основе полиамида, содержащего 20 % железного сурика, показало, что его значения совпадают с аналогичными значениями для пары «сталь—сталь» (рис. 6).

Обсуждение результатов

Согласно молекулярно-механической теории трения [14] сила трения формируется за счет сил сопротивления движению одного из тел относительно другого из-за межатомных и меж-

молекулярных взаимодействий в зонах фактического касания тел, т.е. адгезионных сил,

внедрения более жестких элементов в поверхность менее жестких участков при контактировании твердых тел в результате их различной жесткости или неоднородности их свойств в различных зонах, а также различной жесткости отдельных микронеровностей. При начале относительного движения более твердые участки деформируют поверхность одного из тел. Силы сопротивления, возникающие при этом, могут быть названы деформационными составляющими трения.

Согласно этой теории коэффициент трения скольжения f_T может быть представлен так:

$$f_T = f_0 \left(1 + \frac{S_\phi p_0}{N} \right), \quad (1)$$

где p_0 — удельная сила молекулярного притяжения; S_ϕ — площадь фактического касания; N — нагрузка; f_0 — значение коэффициента трения скольжения при $p_0 = 0$.

Таким образом, при росте нагрузки и постоянной площади касания, т.е. при росте давления в зоне трения, коэффициент трения должен снижаться. Интенсивность этого снижения определяется механическими и адгезионными свойствами материалов, которые определяют также и интенсивность изменения площади фактического касания при росте нагрузки.

Полученные результаты подтверждаются также и данными литературных источников, согласно которым коэффициент трения скольжения полиамида снижается с ростом давления в зоне трения. Например, для полиамида ПА-68 коэффициент трения скольжения меняется от 0,15 при давлении 2,5 МПа до 0,07 при 9,0 МПа, а для поликапролактама от 0,25 до 0,15 [6].

Результаты экспериментов подтверждают предположение [9, 10] о том, что при нанесении тонкослойных полиамидных покрытий на стальную подложку в слое полиамида толщиной до 0,1 мм, непосредственно примыкающем к стальной поверхности, развиваются сильные напряжения сжатия (до 400 МПа) за счет диффузии атомов железа в расплавленный полимер, что

приводит к существенному росту твердости поверхности, а значит, и к увеличению механической составляющей в силах трения.

Существенное отличие адгезионных характеристик композита с использованием железного сурика от композитов с другими добавками, как и эффект роста величины коэффициента трения покоя для слоя толщиной покрытия менее 0,1 мм, может быть предварительно объяснено эффектом сжатия молекул полиамида за счет образования координационных связей между ионами железа Fe^{2+} , входящими в состав железного сурика и стальной подложки, с атомами азота, существующими в расплаве полиамида [9]. В свинцовом сурике и в стеклянном порошке ионы железа отсутствуют.

Выводы

Экспериментально определены значения коэффициента трения покоя и прочности адгезии на отрыв тонкослойных полиамидных, а также и некоторых композитных на их основе покрытий на стальных поверхностях.

Установлено, что коэффициент трения покоя пары «полиамид — сталь» на 40 % ниже, чем у пары «сталь—сталь».

Обнаружен эффект влияния толщины слоя полиамидного покрытия на величину его коэффициента трения покоя по стали. При толщине покрытия менее 0,12 мм наблюдается рост коэффициента трения покоя. При толщинах покрытия более 0,12 мм коэффициент трения покоя полиамида по стали не меняется.

При добавлении в полиамид присадок в виде железного сурика вплоть до 50 % массовой доли сурика образуется композит, адгезия которого к стали больше, чем у чистого полиамида. Максимальных значений в 50 МПа адгезия достигает при содержании железного сурика в 30 % массовой доли.

В соединениях с натягом рационально использовать тонкослойные покрытия, состоящие не из чистого полиамида, а из композита на его основе, содержащего от 20 до 40 % массовой доли железного сурика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алисин В.В. [и др.]. Трение, изнашивание и смазка / под ред. И.В.Крагельского, В.В. Алисина. М.: Машиностроение, 1978. 400 с.
2. Гречищев Е.С., Ильяшенко А.А. Соединения с натягом: Расчеты, проектирование, изготовление. М.: Машиностроение, 1981. 247 с.
3. Каиса А.М., Джода Повышение долговечности и ремонтпригодности в узлах строительных машин с помощью полимерных материалов: Дисс. ... канд. техн. наук. / Л., ЛПИ. 1984.
4. Билик М.М., Слодюкова Н.Н. Антифрикционные свойства некоторых полимерных материалов в монолите и тонкослойном покрытии // Полимеры в промышленности. Гомель. 1968. С. 26–32.
5. Стукач А.В. Исследование работоспособности узлов трения с полимерными покрытиями в гусеничном ходу строительных машин: Дисс. ... канд. техн. наук. / Л., ЛПИ, 1980. 125 с.
6. Чичинадзе А.В. [и др.] Полимеры в узлах трения машин и приборов. Справочник / Под ред. А.В.Чичинадзе. М.: Машиностроение, 1988. 328 с.
7. Митрович В.П. Исследование трения полиамидов по стали. М., 1963. 96 с.
8. Стукач А.В. Исследование и управление свойствами полимерных покрытий в процессе их формирования при восстановлении изношенных поверхностей и придании им антифрикционных свойств // НИИТТС СПбГУСЭ Научно-техническое издание «Технико-технологические проблемы сервиса». СПб. 2009. №10. С. 42–50.
9. Веттегрень В.И. [и др.] Напряженное состояние и износостойкость полимерных покрытий Т. 57, вып. 7. СПб. Физико-технический ин-т им. А.Ф.Иоффе // Физика твердого тела. 2015. С. 1365–1372.
10. Петров В.А., Башкарев А.Я., Веттегрень В.И. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов. СПб.: Политехника, 1993. 475 с.
11. Берлин А.А., Басин И.В. Основы адгезии полимеров. М.: Химия, 1974. 392 с.
12. Иванов С.А., Башкарев А.Я. О долговечности и прочности композитов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. №4 (110). С. 196–199.
13. Иванов А.С., Попов Б.А. Расчет соединения с натягом с учетом контактной жесткости сопрягаемых поверхностей // Вестник машиностроения. 2005. № 4. С. 31–36.
14. Чичинадзе А.В. [и др.], Основы трибологии / Под ред. А.В.Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2001. 663 с.
15. Bickermann J.J. The science of Adhesives Joints. New York: Academic Press, 1968. 241 p.
16. Gardon J. Treatise on adhesion and adhesives. New York: Academic Press, 1967. P. 67–70.
17. Pakham D., Grad R. Aspects of adhesion. London. 1971. №6. P. 127–149.

REFERENCES

1. Alisin V.V. [i dr.], Treniye, iznashivaniye i smazka, pod red. I.V.Kragelskogo, V.V. Alisina [Friction, wear and lubrication, ed. I.V. Kragelskogo, V.V. Alisin]. M., Mashinostroyeniye, 1978. 400 s.
2. Grechishchev Ye.S., Ilyashenko A.A. Soyedineniya s natyagom: Raschety, proyektirovaniye, izgotovleniye [Compounds with interference: Calculation, design, manufacture]. M., Mashinostroyeniye, 1981. 247 s.
3. Kaisa A.M. Dzhoda Povysheniye dolgovechnosti i remontoprigodnosti v uzlakh stroitelnykh mashin s pomoshchyu polimernykh materialov: diss. kand. tekhn. Nauk [Increase of durability and maintainability at the sites of construction machinery by using polymeric materials: diss. cand. tehn. Sciences], L., LPI, 1984.
4. Bilik M.M., Slyudikova N.N. Antifriktsionnyye svoystva nekotorykh polimernykh materialov v monolite i tonkosloynom pokrytii [Anti-friction properties of some polymeric materials in the monolith and thin-film coating]. Polimery v promyshlennosti, Gomel. 1968. S. 26–32.
5. Stukach A.V. Issledovaniye rabotosposobnosti uzlov treniya s polimernymi pokrytiyami v gusenichnom khodu stroitelnykh mashin: diss. kand. tekhn. Nauk [Investigation of efficiency units of friction with polymer coatings in construction machinery crawler: diss. cand. tehn. Sciences]. L., LPI. 1980. 125 s.
6. Chichinadze A.V. [i dr.]. Polimery v uzlakh treniya mashin i priborov [The polymers in friction units of machines and devices]. Spravochnik.; pod red. A.V.Chichinadze, M., Mashinostroyeniye. 1988. 328 s.
7. Mitrovich V.P. Issledovaniye treniya poliamidov po stali [Research on steel friction polyamides]. M., 1963. 96 s.
8. Stukach A.V. Issledovaniye i upravleniye svoystvami polimernykh pokrytiy v protsesse ikh formirovaniya pri vosstanovlenii iznoshennykh poverkhnostey i pridanii im antifriktsionnykh svoystv [Research and management of the properties of polymer coatings in the process of their formation in the reduction of worn surfaces and giving them anti-friction properties]. Nauchno-tekhnicheskoye izdaniye NIITTS SPbGUSE «Tekhniko-tehnologicheskiye problemy servisa», SPb, 2009. №10. S. 42–50.
9. Vettegren V.I. [i dr.]. Napryazhennoye sostoyaniye i iznosostoykost polimernykh pokrytiy [The state of stress and wear coatings]. Fizika tverdogo tela, tom 57, vyp.7, SPb, Fiziko tekhnicheskiiy in-t im. A.F.Ioffe, 2015. S. 1365–1372.

10. **Petrov V.A., Bashkarev A.Ya., Vettegren V.I.** Fizicheskiye osnovy prognozirovaniya dolgovechnosti konstruktsionnykh materialov [Physical basis of forecasting the durability of structural materials]. SPb: Politehnika, 1993. S. 475.
11. **Berlin A.A., Basin I.V.** Osnovy adgezii polimerov [Fundamentals of polymer adhesion]. M.: Khimiya, 1974. S. 392.
12. **Ivanov S.A., Bashkarev A.Ya.** O dolgovechnosti i prochnosti kompozitov [The durability and strength of the composites]. Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU, №4 (110), SPb, Izd. SPbGPU, 2011. S. 196–199.
13. **Ivanov A.S., Popov B.A.** Raschet soyedineniya s natyagom s uchetom kontaktnoy zhestkosti sopryagayemykh poverkhnostey [Calculation of the compound with a tightness in view of the contact stiffness of mating surfaces]. Vestnik mashinostroyeniya, 2005. № 4. S. 31–36.
14. **Chichinadze A.V. [i dr.]**, Osnovy tribologii. pod red. A.V.Chichinadze [Fundamentals of tribology. ed. A.V.Chichinadze], M., Mashinostroyeniye, 2001. 663 s.
15. **Bikermann J.J.** The science of Adhesives Joints, New York: Academic Press, 1968. 241 p.
16. **Gardon J.** Treatise on adhesion and adhesives. New York, Academic Press 1967, p. 67-70.
17. **Pakham D., Grad R.** Aspects of adhesion. London, 1971. №6. P. 127–149.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

КУЩЕНКО Александра Владимировна – аспирант Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: aleksandra.kushchenko@rambler.ru

KUSHCHENKO Aleksandra V. – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: aleksandra.kushchenko@rambler.ru

БАШКАРЕВ Альберт Яковлевич – доктор технических наук профессор, советник при ректорате Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: bashkarev@spbstu.ru

BASHKAREV Albert Ya. – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: bashkarev@spbstu.ru