

## Список литературы

1 Научно-технический прогресс в машиностроении: Современные методы упрочнения поверхностей деталей машин: Обзор. информ. Вып. 9 / Под ред. акад. К. В. Фролова. – М.: МЦНТИ, 1991. – 187 с.

2 *Рогачев А. В., Назаренко В. В., Хвалько В. В.* Современные методы обработки материалов и их применение для повышения долговечности деталей подвижного состава // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2001. – № 2. – С. 45–48.

3 *Сидорский С. С.* Энерго- и ресурсосберегающие технологии поверхностного модифицирования машиностроительных полимерных материалов // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2001. – № 2. – С. 18–23.

4 *Сидорский С. С., Рогачев А. В.* Вакуумно-плазменные методы обработки машиностроительных материалов / Материалы, технологии и оборудование для упрочнения и восстановления деталей машин / Под общей редакцией П. А. Витязя, С. А. Остапчика. – Мн.: УП «Технопринт»; Новополоцк, НГУ, 2003. – С. 8–12.

5 *Рогачев А. В., Саркисов О. А., Казаченко В. П., Сидорский С. С.* Влияние ионной обработки полимерных материалов на их поверхностные свойства // Полимерные композиты – 2000: Междунар. науч.-техн. конф.: Сб. докл. – Гомель, 2000. – С. 55–59.

6 *Егоров А. И.* Физико-химические закономерности процессов массопереноса при плазмохимическом окрашивании и аппретировании полиэтилентерефталата: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Гомель, 1999. – 19 с.

7 *Петров С. В.* Триботехнические свойства резин, поверхностно-модифицированных в активной газовой фазе: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Гомель, 2002. – 22 с.

8 *Гаврильчик В. Т., Егоров А. И., Казаченко В. П., Стош А. А.* Особенности обработки многослойных и капиллярно-пористых полимерных материалов в плазме барьерного разряда // Полимерные композиты-2003: Тез. докладов ИНТК. / ИММС НАНБ. – Гомель, 2003. – С. 36–37.

9 *Сидорский С. С., Рогачев А. В.* Физика и технология полимерных материалов. – Гомель: БелГУТ, 1994. – С. 11–15.

10 *Бердичевский М. Г., Марусин В. В.* Нанесение покрытий, травление и модифицирование полимеров с использованием низкоэнтальпийной неравновесной плазмы. – Новосибирск: Институт теплофизики, 1993. – 107 с.

11 *Попов А. Н., Казаченко В. П., Рогачев А. В., Сидорский С. С.* Повышение износостойкости поверхностей трения путем нанесения многослойных покрытий // Трение и износ. – 2001. – Т. 22, № 3. – С. 317–321.

12 *Рогачев А. В.* Осаждение полимерных покрытий из активной газовой фазы // Вакуумные технологии и оборудование: Сб. статей. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2003. – С. 123–140.

13 *Рогачев А. В., Казаченко В. П., Попов А. Н.* Износостойкое покрытие для рабочих поверхностей плунжерных пар топливных насосов / Патент РБ № 3886, решение 28.09.2000 г.

14. *Казаченко В. П.* Кинетика электронно-лучевого диспергирования полимеров в вакууме, структура, свойства покрытий, полученных осаждением летучих продуктов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1992. – 23 с.

15 *Казаченко В. П., Рогачев А. В.* Закономерности диспергирования политетрафторэтилена потоком электронов средних энергий // Химия высоких энергий. – 1999. – Т. 33, № 4. – С. 270–273.

16 *Рогачев А. В., Казаченко В. П., Палий О. И.* Способ обработки волокнисто-тканевого материала / Патент № 1569, решение от 20.03.1996 года.

17 *Рогачев А. В., Егоров А. И., Казаченко В. П., Сидорский С. С.* Влияние технологических режимов электронно-лучевого диспергирования политетрафторэтилена на скорость роста покрытий из газовой фазы // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2000. – Т. 5, № 2. – С. 77–80.

18 *Егоров А. И., Казаченко В. П., Рогачев А. В., Яблоков М. Ю.* Динамика начальных стадий формирования покрытий политетрафторэтилена и их свойства // Журнал физической химии. – 2002. – Т. 76, № 11. – С. 2085–2089.

19 *Казаченко В. П., Рогачев А. В., Сидорский С. С.* Особенности формирования и структура наноконпозиционных вакуумных полимерных покрытий // Транстех-2002: Первая международная науч.-практ. конф.: Сб. материалов – Гомель, 2002. – С. 143–145.

Получено 04.11.2003

**A. V. Rogachev, O. A. Sarkisov, V. T. Gavrilchik.** Condition and prospects of development plasma and plasmachemistry methods of processing of materials.

The analysis modern plasma methods of processing of machine-building materials is given.

---

**Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. 2003. № 2(7)**

---

УДК 621.822-035.3

*В. И. ВРУБЛЕВСКАЯ, доктор технических наук; К. М. СИДОРЕНКО, аспирант; В. Г. ХВОРЫГИН, аспирант; А. Б. НЕВЗОРОВА, кандидат технических наук; Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УЗЛОВ ТРЕНИЯ С ПОДШИПНИКАМИ НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСИНЫ

Рассматривается проблема прогнозирования триботехнических свойств узлов трения. Приведена методика математического моделирования режимов трения и описано программное обеспечение, позволяющее осуществлять его.

**О**дной из основных проблем машиностроения является долговечность и надёжность машин, которые, как показала практика, в основ-

ном определяются выходом из строя подвижных сопряжений, меняющих свои размеры под воздействием сил трения. Это приводит к потере точно-

сти, понижению КПД машин, а также к отказам их в работе по причине задигов и заедания подвижных сопряжений.

В связи с этим в БелГУТе создан новый износостойкий подшипниковый материал на основе прессованной древесины, пропитанной смазками, модифицированными искусственными полимерами. С использованием этого материала были разработаны подшипники скольжения самосмазывающиеся (ПСС) для внедрения их в узлы трения различных машин и механизмов [1, 2]. Но вместе с тем успешное решение проблемы повышения надёжности того или иного узла трения при внедрении ПСС зависит от того, насколько точно будут предварительно определены триботехнические характеристики узла трения.

Однако при лабораторных испытаниях это обусловлено исключительной сложностью моделирования всего процесса трения с соблюдением необходимых условий идентичности физической модели с натурными образцами. Поэтому при прогнозировании и анализе процесса трения фрикционных узлов без длительных экспериментов в лабораторных и производственных условиях наиболее приемлемо математическое моделирование.

Успешное проведение математического эксперимента в значительной степени зависит от правильного выбора плана эксперимента, который, кроме того, определяет статистический анализ результатов. Выбор метода анализа зависит от алгебраической модели, подходящей к различным способам обработки данных, и от известного или предполагаемого распределения вероятностей ошибок измерения.

В нашем случае математическая модель процесса трения нелинейна, она может аппроксимиро-

ваться полиномом. Однако при получении математической модели количество необходимых опытов при возрастании числа членов этого полинома резко увеличивается. В связи с этим нужно иначе решать вопросы о числе уравнений, центре эксперимента и принципах оптимальности применяемых планов.

Для решения этих вопросов использован дифференцированный подход, который представляет собой совокупность (синтез) численных методов и методов теории планирования эксперимента [3].

Суть данного подхода заключается в следующем [4, 5]:

1 Предполагается, что экспериментальные данные покрывают не менее 30 % области прогнозируемого режима работы узла трения и занимают область от  $-1 \cdot A$  до  $1 \cdot A$  в центре области (E) (рисунок 1).

2 С помощью полиномиальной аппроксимации по методу наименьших квадратов (полиномиальной регрессии) определяются значения области всех режимов работы узла, которые покрывают от  $-1,5 \cdot A$  до  $-1 \cdot A$  и от  $1 \cdot A$  до  $+1,5 \cdot A$ .

3 В области данных от  $-2 \cdot A$  до  $-1,5 \cdot A$  и от  $1,5 \cdot A$  до  $2 \cdot A$  значения определяются с помощью метода рототабельного центрально-композиционного планирования.

4 В области данных менее  $-2 \cdot A$  и более  $2 \cdot A$  значения определяются способом статистического прогнозирования методом Монте-Карло.

5 После определения значений области всех режимов работы узла с помощью метода кубической интерполяции на неравномерной сетке определяем итоговые уравнения, описывающие математическую модель.

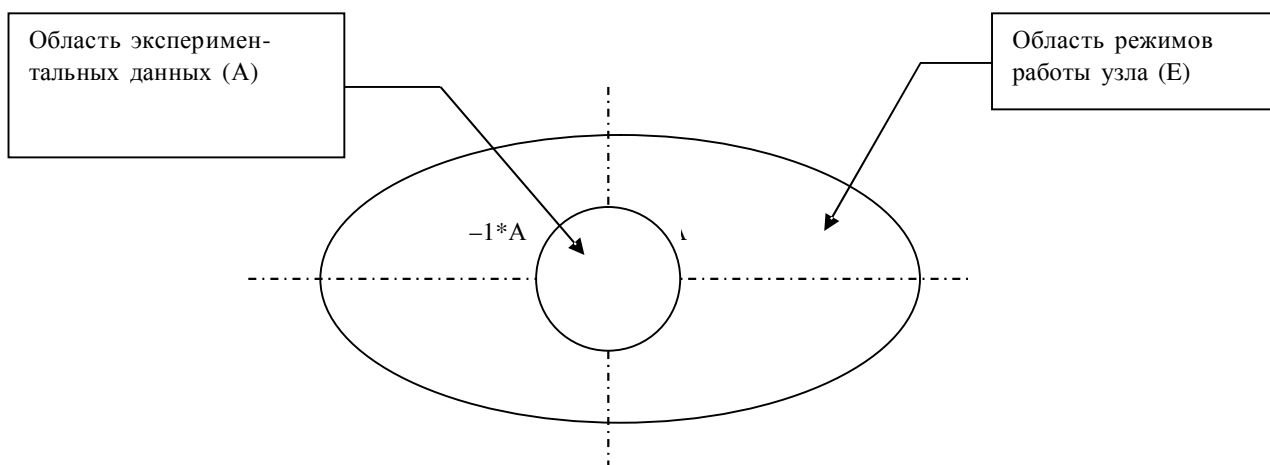


Рисунок 1 – Условная схема областей данных

Основной отличительной особенностью данного подхода является применение разных мето-

дов прогнозирования в зависимости от удаленности от области экспериментальных данных

(глубины прогноза). В случае применения какого-либо одного метода на всей прогнозируемой области погрешность прогноза была бы неравномерной и в зависимости от метода в определенных областях имела бы большие значения. Применение этой методики позволяет осуществлять прогноз с равномерной погрешностью по всей области режимов работы узла трения.

Сущность методов, используемых нами при прогнозировании триботехнических свойств ПСС, состоит в следующем [6, 7].

*Метод наименьших квадратов:* так как вещественные функции задаются таблично, т. е. на конечном множестве точек, то их скалярное произведение определяются формулой

$$(f, \varphi) = \sum_{i=1}^N \rho_i = \sum_{i=1}^N \rho_i f(x_i) \varphi(x_i), \quad \rho_i > 0,$$

где  $N$  – полное число узлов таблицы. Тогда условие наилучшего среднеквадратичного приближения примет вид

$$S_{\varphi}^2 = \sum_{i=1}^N \rho_i [y(x_i) - \varphi(x_i)]^2 = \min.$$

Выбираем линейную аппроксимацию

$$\varphi(x) = \sum_{k=1}^n a_k \varphi_k(x)$$

с числом членов  $n \leq N$ . Тогда коэффициенты аппроксимации находим из уравнений

$$\sum_{m=1}^n (\varphi_k, \varphi_m) a_m = (y, \varphi_k), \quad 1 \leq k \leq n.$$

*Метод рототабельного центрально-композиционного планирования:* к точкам полного факторного эксперимента добавляются точки в центре плана и точки, расположенные на всех осях координат на расстояниях  $\pm \alpha = 2^{n/4}$  от центра.

*Метод Монте-Карло:* при нахождение значения  $a$  некоторой изучаемой величины выбираем такую случайную величину  $X$ , математическое ожидание которой равно  $a$ :  $M(X) = a$ .

Практически же поступают так: производят  $n$  испытаний, в результате которых получают  $n$  возможных значений  $X$ ; вычисляют их среднее арифметическое  $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$  и принимают  $x$  в качестве оценки (приближённого значения)  $a^*$  искомого числа  $a$ :

$$a \approx a^* = \bar{x}.$$

Применение вышеперечисленного комплекса методов прогнозирования невозможно без соответствующего программно-аппаратного обеспечения. И поэтому разработана программа для прогноза поведения основных характеристик ПСС ( $f, t$ ) при определённых режимах работы узла трения ( $v, p, R_a, t_{окр}$ ). Данная программа в качестве вычислительного ядра использует пакет MATLAB (не ниже версии 5.3) [8]. Расчётные модели могут быть представлены в виде трёхмерных поверхностей, что вызывает особый интерес у исследователей, так как позволяет визуально определять зоны так называемого “шума”, т. е. возможных погрешностей эксперимента. Помимо этого программа содержит в себе реляционную базу данных по стандартным ПСС, которая позволяет осуществить выбор необходимого подшипника, что представляет интерес для конструкторов (рисунок 2) [9].

Программа может произвести расчёт ПСС как стандартного, так и разрабатываемого подшипника, работающего при заданных параметрах скорости ( $v$ ), нагрузки ( $p$ ), температуры окружающей среды ( $t_{окр}$ ), материала вала и его класса шероховатости ( $R_a$ ) (рисунок 3).

В результате проведённого прогнозирования триботехнических свойств ПСС, с учётом вышеперечисленных силовых и геометрических факторов, получены графики, описывающие поведение данного материала при работе в заданном узле механизма (рисунок 4).

Для взаимодействия с другими программами предусмотрен экспорт и импорт данных в форматы (\*.txt, \*.html, \*.dbf).

Количественный и качественный выигрыш от применения этой системы математического моделирования на ЭВМ состоит в следующем:

- полностью отпадает необходимость в длительном и трудоёмком изготовлении лабораторного макета (образца) или получении промышленного макета, в затратах на комплектующие для изготовления макетов и установок, в измерительных приборах и оборудовании для испытаний;
- значительно сокращается время определения характеристик (а следовательно, и доводки объекта) и время испытаний;
- большая точность прогноза поведения материала в условиях воздействия на него внешне-силовых факторов.

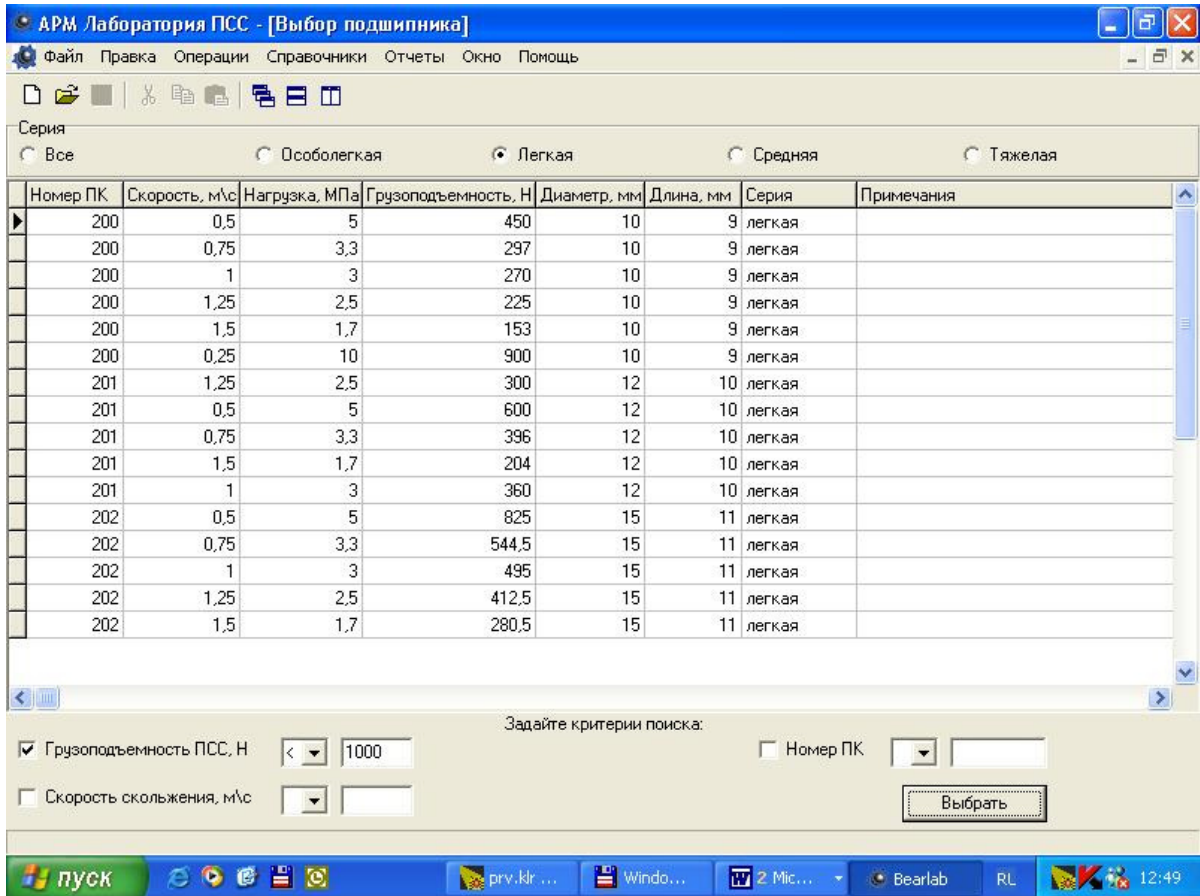


Рисунок 2 – База данных ПСС

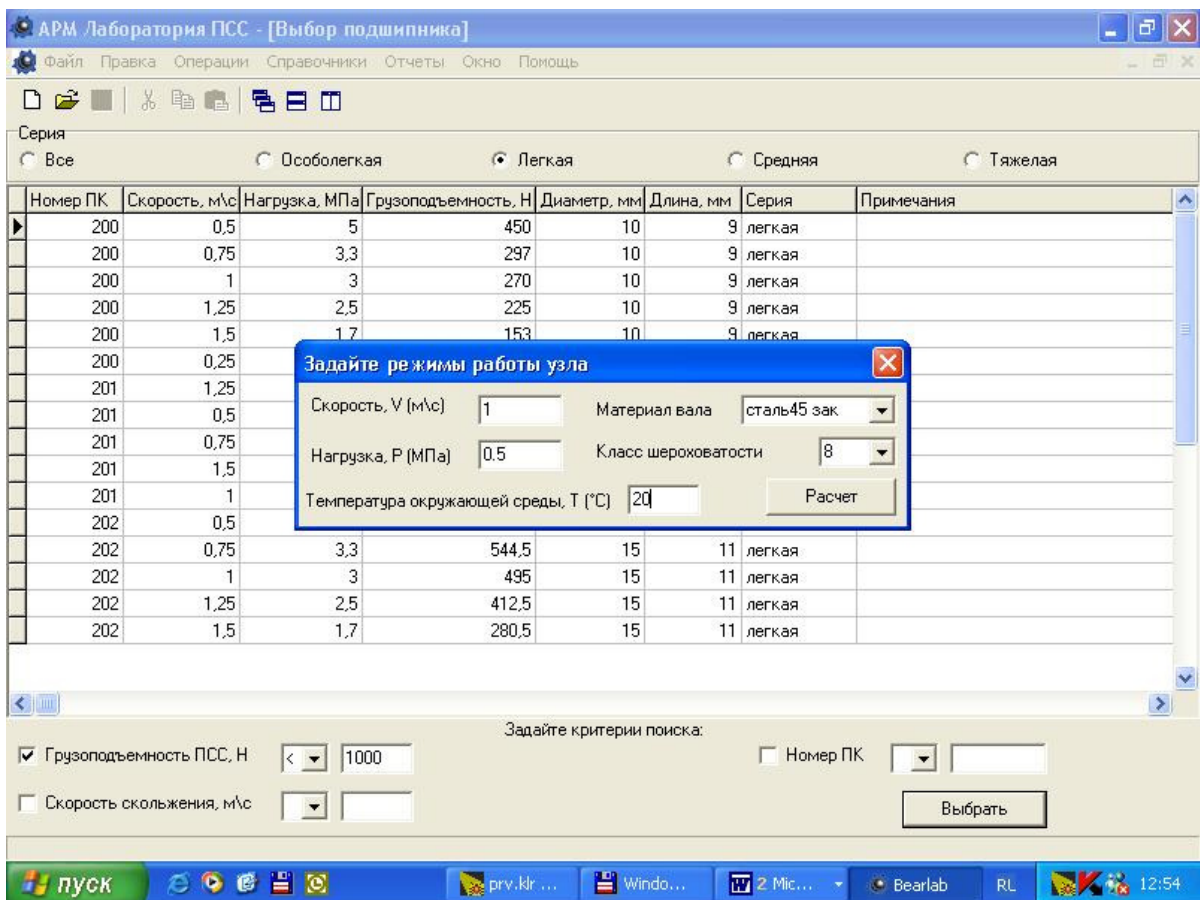
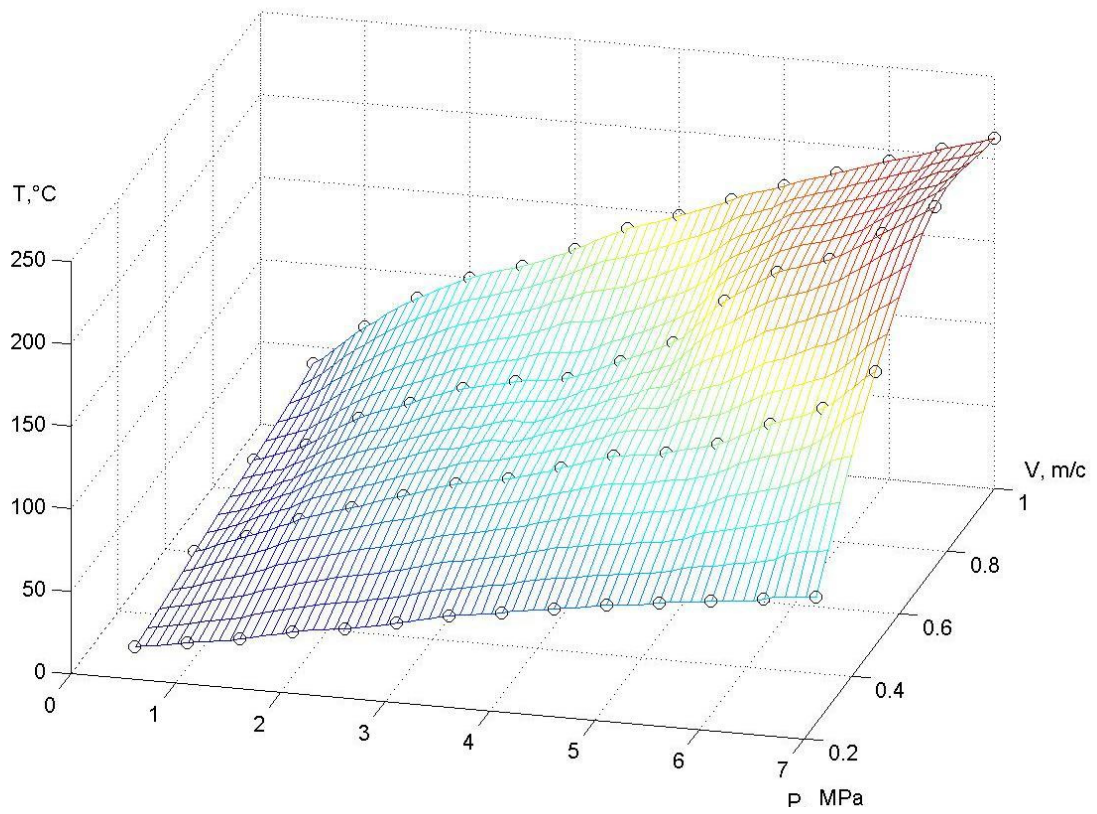


Рисунок 3 – Расчёт триботехнических свойств ПСС

a)



б)

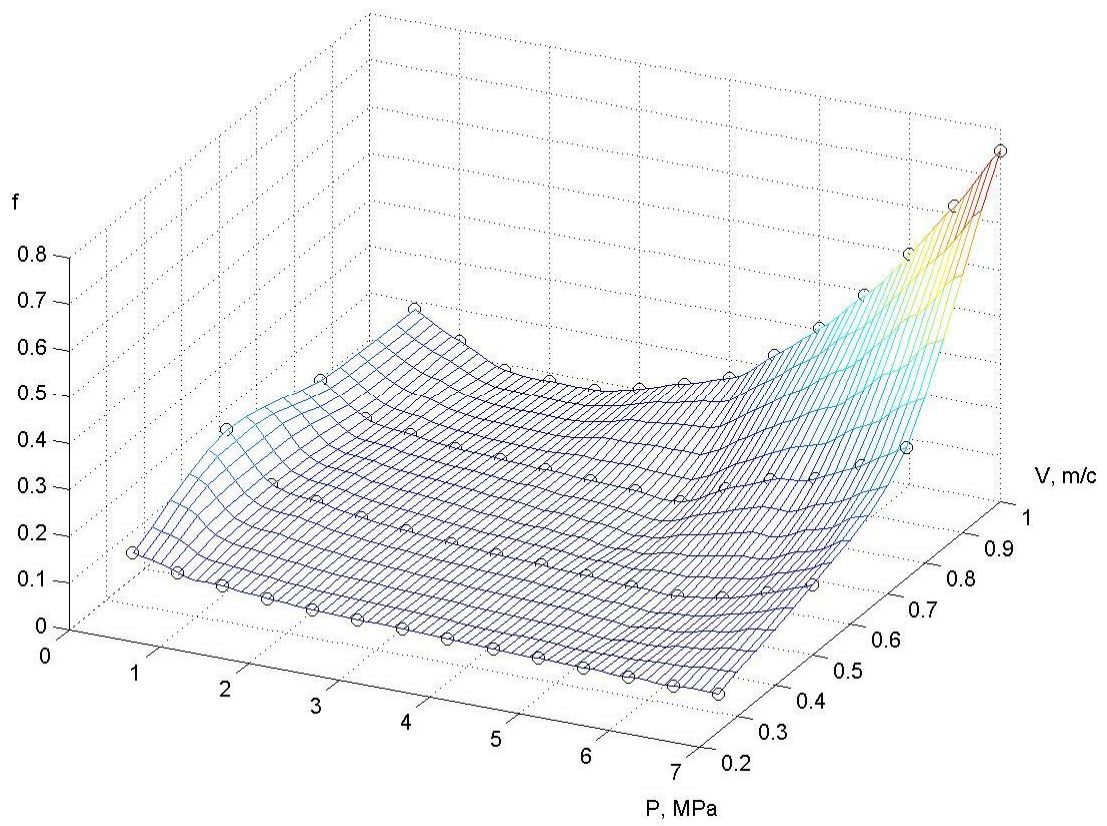


Рисунок 4 – Результаты моделирования работы ПСС:  
а – модель температурного поля в зоне трения; б – модель коэффициента трения

### Список литературы

- 1 Врублевская В. И., Невзорова А. Б., Врублевский В. Б. Износостойкие самосмазывающиеся антифрикционные материалы и узлы трения из них. – Гомель: БелГУТ, 2000. – 324 с.
- 2 Врублевская В. И., Невзорова А. Б., Врублевский В. Б. Износостойкие подшипники на основе природного полимера // Вузовская наука и промышленность: международное сотрудничество. Ч. 1: Материалы II междунар. науч.-практ. конф. Минск 14–16 октября 1998 г. – Минск, 1998. – С. 79–83.
- 3 Калиткин Н. Н. Численные методы. – М.: Наука, 1978. – 512 с.
- 4 Скурихин В. И., Шифрин В. Б., Дубровский В. В. Математическое моделирование. – К.: Техніка, 1983. – 270 с.
- 5 Грубов В. И. Математическое моделирование непрерывных технологических процессов. – К.: Вища школа, 1971. – 175 с.
- 6 Круг Г. В., Сосулин Ю. А., Фатуев В. А. Планирование эксперимента в задачах идентификации. – М.: Наука, 1977. – 207 с.
- 7 Кунц Р. С. Численный анализ. – К.: Техніка, 1964. – 390 с.
- 8 Дьяконов В. MATLAB: учебный курс. – СПб.: Питер, 2001. – 560 с.
- 9 Бобровский С. Delphi 6 и Kylix: библиотека программиста. – СПб.: Питер, 2002. – 560 с.

Получено 30.10.2003

**V. I. Vrublevskaja, K. M. Sidorenko, V. G. Khvoryhin, A. B. Nevzorova** The use of mathematical modeling for forecasting of friction units tribotechnical properties with bearings on the basis of wood

The problem of forecasting of friction units tribotechnical properties is considered. Methods of friction regimes mathematical models.

---

Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. 2003. № 2(7)

---

УДК 621.315.592

*О. А. САРКИСОВ, ассистент; Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель.*

## МОРФОЛОГИЯ И АДГЕЗИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК, ОБРАБОТАННЫХ В БАРЬЕРНОМ РАЗРЯДЕ

Исследована кинетика морфологических изменений, адсорбционных и адгезионных свойств поверхности полиимидной пленки в зависимости от дозы обработки в барьерном разряде. Показано, что обработка в плазме барьерного разряда существенно влияет на морфологию и адсорбционные свойства поверхности полиимида, приводит к увеличению адгезионной прочности сварного соединения полиимид-фторопласт (ПИ–ФТ). Предложен механизм активации полиимидно-фторопластовой пленки в плазме барьерного разряда.

При обработке полимерного материала в плазме электрических разрядов под действием высокоэнергетичных частиц, ионов и электронов, жесткого ультрафиолетового излучения в поверхностных слоях протекают сложные физико-химические процессы [1, 2], характер влияния которых на активационный эффект изучен недостаточно. В частности, в работах [3, 4] отмечено, что повышение адсорбционной активности обработанных в плазме тлеющего разряда полимеров в первую очередь обусловлено образованием в поверхностных слоях электретных структур. Известны данные о значительном влиянии процессов деструкции, сшивки, окисления, травления, протекающих при плазменной обработке, на структуру и свойства поверхностных слоев [5].

Комплексное, неоднозначное влияние этих процессов на свойства конкретного полимера определяет необходимость проведения в каждом отдельном случае экспериментальных исследований, на основании результатов которых можно выбрать и обосновать наиболее эффективный метод обработки поверхности, оптимизировать его технологические режимы.

Основной целью данной работы являлось изучение влияния воздействия барьерного разряда на изменение структуры и свойств поверхности полиимидно-фторопластовой пленки (ПМФ-351), установление зависимости кинетики изменения адгезионной прочности сварного соединения ПИ–ФТ от дозы обработки полиимидной пленки.

Методика исследования. Исследуемый материал представлял собой двухслойную полиимидно-фторопластовую пленку ПМФ-351 общей толщиной  $50 \pm 6$  мкм (ПИ – 40 мкм, покрытие сополимера тетрафторэтилена с гексафторпропиленом – 10 мкм).

Обработка пленки производилась в плазме барьерного разряда при атмосферном давлении на установке мощностью 300 Вт, с линейной зоной обработки шириной 300 мм. Схема установки приведена на рисунке 1.

Об адгезионных свойствах пленок судили по величине адгезионной прочности сварного соединения ПИ–ФТ, которую измеряли методом нормального отрыва на разрывной машине РМП-2. Сварное соединение получали путем выдержки пленок в течение 45 секунд между плитами пресса при температуре  $350$  °С и удельном давлении  $0,24$  Н/см<sup>2</sup>.