ФИЗИКА

УДК 620.22

ИССЛЕДОВАНИЕ ФРИКЦИОННОГО ИЗНОСА КОНСТРУКЦИОННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ

Алоев В.З., Жирикова З.М.*

Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова

*zaira.dumaeva@mail.ru

Аннотация. *Изучен фрикционный износ конструкционных углепластиков на основе фенилона и сверхвысокомолекулярного полиэтилена. Обнаружено монотонное увеличение интенсивности фрикционного износа с ростом параметра, характеризующего уровень сдвиговой устойчивости полимерных композитов. Показано, что устойчивость полимерной матрицы к деформации сдвига является универсальной характеристикой, применяемой для описания процесса фрикционного износа полимерных материалов. Результаты, полученные в работе, позволят разработать методику прогнозирования интенсивности фрикционного износа как функции давления и скорости скольжения.*

Ключевые слова: фрикционный износ, углепластик, углеродное волокно, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, фенилон, интенсивность износа, фрактальная размерность

INVESTIGATION OF FRICTIONAL WEAR OF STRUCTURAL CARBON PLASTICS

Aloev V.Z., Zhirikova Z.M.

Kabardino-Balkarian State Agricultural University

Abstract. *The article is devoted to the study of frictional wear of structural carbon plastics based on phenylene and ultrahigh molecular weight polyethylene. A monotonous increase in the intensity of frictional wear was found with an increase in the parameter characterizing the level of shear stability of polymer composites. It is shown that the resistance of the polymer matrix to shear deformation is a universal characteristic used to describe the process of frictional wear of polymer materials. The results obtained in the work will allow us to develop a methodology for predicting the intensity of frictional wear as a function of pressure and sliding velocity.*

Keywords: frictional wear, carbon fiber, carbon fiber, ultrahigh molecular weight polyethylene, phenylene, wear rate, fractal dimension

Введение

В настоящее время одной из актуальных проблем современного машиностроения является повышение надежности и долговечности конструкции рабочих органов [1, 2]. Решение данной проблемы заключается в использовании полимерных конструкционных материалов (инженерных пластиков) вместо традиционных металлических. В сравнении с металлическими, полимерные материалы более технологичны, обеспечивают значительное снижение массы изделий, обладают высокими значениями эксплуатационных свойств в широком интервале температур. Этому способствует создание композиционных материалов с заданными трибологическими характеристиками, обеспечивающими стабильную работу узлов трения.

Среди современных антифрикционных материалов углепластики выделяются высокой износостойкостью и прочностью, что делает их привлекательными для различных отраслей [3]. Однако, несмотря на эти преимущества, их антифрикционные свойства пока не достигают уровня, необходимого для некоторых критически важных применений.

Эффективным способом решения этой проблемы является модификация их путем введения углеродных волокон с высокими антифрикционными свойствами.

В связи с этим **целью настоящей работы** является изучение влияния углеродных волокон на интенсивность фрикционного износа углепластиков.

Методы и объекты исследования

В качестве полимерного связующего использованы фенилон С-2 (ароматический полиамид) [4] и сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) [5]. Фенилон С-2 характеризуется температурой стеклования 553 К и представлен в виде мелкодисперсного порошка с насыпной плотностью 330 кг/м³. СВМПЭ имеет молекулярную массу около $1{,}3\times10^6$, плотность 933 кг/м³ и температуру плавления приблизительно 408 К. В качестве наполнителя использовался высокомодульное углеродное волокно (УВ) марки «Урал 15» с диаметром волокон 7-9 мкм и длиной 3 мм. Плотность волокна составляет 1320 кг/м³. Массовая доля углеродного наполнителя в исследованных образцах составляла 15 %, что соответствует объемному наполнению $\varphi_н \approx 0{,}115$.

Образцы для испытаний готовили методом "сухого" смешения компонентов во вращающемся электромагнитном поле. В реактор загружали порошкообразный полимер, углеродные волокна (УВ) и неравновесные ферромагнитные частицы длиной 40 мм. Реактор помещали в расточку генератора электромагнитного аппарата. Под воздействием вращающегося электромагнитного поля ферромагнитные частицы начинали движение, сталкиваясь друг с другом, что приводило к хаотическому распределению УВ в полимерной матрице. В процессе соударений происходило истирание ферромагнитных частиц, и продукты износа включались в состав композиции. Для удаления ферромагнитных частиц из смеси применяли магнитную и механическую сепарацию [6].

Исследование интенсивности фрикционного износа проведено в условиях сухого трения. Для этого блочные образцы подвергались износу без использования смазочных материалов. Условия эксперимента: нагрузка – 0,15 МПа, скорость скольжения – 0,25 м/с, путь трения – 1000 м. Испытания проводились по схеме «диск–пальчик». Испытания проводились на дисковой машине трения СМЦ-2. Схема установки представлена на *рисунке 1*.

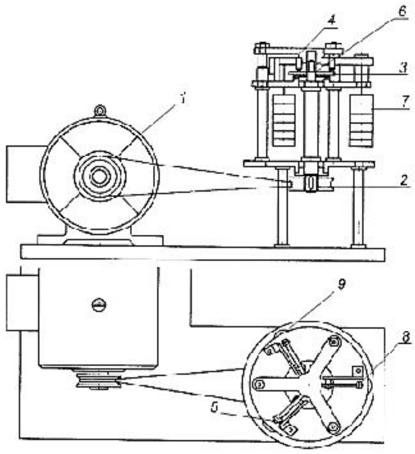

Рисунок 1 – Дисковая машина трения

Машина приводится в движение электродвигателем постоянного тока *1*. Крутящий момент от двигателя передается на вертикальный вал *2* через ременную передачу. На этот вал устанавливается сменный диск *3*, изготовленный из стали 45 (ГОСТ 1050-2013 Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия) и термообработанный до твердости 45–48 HRC. Поверхность диска имеет шероховатость R_a = 0,16–0,32 мкм. К жестко закрепленной крестовине *4* независимо крепятся три рычага *5*, в которых размещаются образцы композитов *6*. Нормальное давление на образцы создается с помощью съемных грузов *7*, устанавливаемых на рычагах. Независимые положения рычагов (отношения плеч 1:2:6) позволяют одновременно испытывать от 1 до 3 образцов. Во время эксперимента частицы износа удаляются с поверхности диска с помощью трех щеток *9*. Точность измерения силы трения и линейного износа составляет ± 5 %. Перед началом испытаний проводится приработка диска трением по образцу в течение 20 сек, после чего диск промывается бензином для удаления загрязнений.

Износ образцов определялся весовым методом с использованием аналитических весов ВЛР-200 с точностью до ± 0,1 мг. Интенсивность линейного износа рассчитывалась по методике, изложенной в работе [7].

Результаты исследования

В работе [8] установлено, что для углепластиков на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) и фенилона наблюдается снижение интенсивности линейного фрикционного износа при уменьшении параметра $R_{кр}$, характеризующего уровень сдвиговой устойчивости полимерных композитов.

Ранее было показано [9], что температуру $T_к$ в зоне трения можно определить с использованием уравнений (1) и (2).

$$T_к = 293 + 72(p\upsilon)^{1/2}\ , \qquad (1)$$

$$T_к = 293 + 1/3(p\upsilon)(3 - d_f)\cdot \qquad (2)$$

Комбинация указанных уравнений позволяет вывести аналитическое выражение для определения фрактальной размерности структуры углепластиков (d_f) как функции ($p\upsilon$):

$$d_f = d - \frac{72}{113(p\upsilon)^{1/2}}, \qquad (3)$$

где d – размерность евклидова пространства, в котором рассматривается фрактал (очевидно, в данном случае d=3).

Из уравнения (3) следует, что по мере увеличения произведения ($p\upsilon$) возрастает фрактальная размерность d_f структуры углепластика. Это явление обусловлено повышением температуры $T_к$ в зоне трения. В свою очередь, коэффициент Пуассона ν можно определить на основе значения d_f с использованием уравнения [10]

$$d_f = (d-1)(1+\nu)\cdot \qquad (4)$$

Используя значение коэффициента Пуассона, определенное с помощью уравнения (4) можно рассчитать параметр $R_{кр}$ согласно уравнению (5) [10]:

$$R_{кр} = \frac{\nu B'}{4(1+\nu)^{1/2}}, \qquad (5)$$

где B' равно [10]

$$B' = \left(\frac{\partial B}{\partial P}\right)_T = 2(m+n+1)\cdot \qquad (6)$$

В уравнении (6) выражение $\left(\frac{\partial B}{\partial P}\right)_T$ представляет изотермическую производную объемного модуля упругости B по давлению P. Параметры m и n в уравнении Леннарда-Джонса зависят от структурных характеристик материала, таких как размер частиц, межмолекулярные взаимодействия и кристаллическая структура. Эта зависимость имеет вид [11]

$$mn = \frac{6(1+\nu)}{1-2\nu}, \qquad (7)$$

где ν – минимальная для углепластиков на основе фенилона величина коэффициента Пуассона, равная 0,146.

На *рисунке 2* представлена зависимость интенсивности линейного фрикционного износа I от параметра $R_{кр}$ для углепластиков на основе фенилона в диапазоне варьирования давления p от 1,0 до 2,0 МПа и скорости скольжения υ от 1,0 до 2,5 м/с, что соответствует изменению параметра $p\upsilon$ от 1,0 до 5,0 МПа·м/с.

Наблюдается монотонное увеличение интенсивности износа I с ростом $R_{кр}$. Для сравнения на том же графике сплошной линией представлена зависимость $I(R_{кр})$ для углепластиков на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). Указанная зависимость количественно согласуется с данными для углепластиков на основе фенилона, выступая для последних в качестве нижней границы. Это соответствие можно значительно улучшить, варьируя параметр (B') в уравнении (5). Увеличение значения $p\upsilon$ приводит согласно уравнению (3) к повышению d_f, а значит и к росту ν. Согласно уравнению (7), это вызывает повышение произведения mn и, соответственно, увеличение суммы ($m + n + 1$). Параметр $R_{кр}$ позволяет классифицировать типы разрушения материалов: при $R_{кр} < 1/\sqrt{2}$ разрушение носит хрупкий характер; при $1/\sqrt{2} \le R_{кр} \le 1{,}0$ разрушение является хрупко-вязким; при $R_{кр} > 1{,}0$ разрушение имеет вязкий характер. На *рисунке 2* эти границы отмечены вертикальными штриховыми линиями. Анализ показывает, что разрушение углепластиков на основе фенилона при трении в исследуемом диапазоне значений $p\upsilon$ имеет хрупко-вязкий характер.

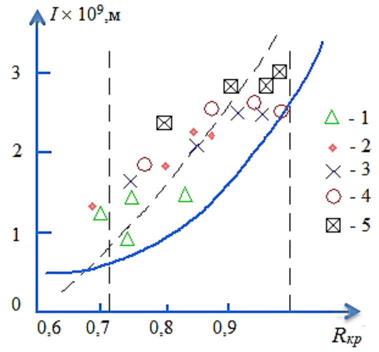

Рисунок 2 – Зависимость интенсивности линейного фрикционного износа I от величины параметра $R_{кр}$ для углепластиков на основе фенилона при давлении p: 1,0 (1), 1,4 (2), 1,6 (3), 1,8 (4) и 2,0 (5) МПа. Сплошная линия – данные для углепластиков на основе СВМПЭ; вертикальные штриховые линии указывают переход от хрупкого к хрупко-вязкому (6) и от хрупко-вязкого к вязкому (7) типам разрушения

Результаты, приведенные на *рисунке 2* позволяют получить приближенное соотношение между I и $R_{кр}$ в формуле

$$I \approx 6{,}3\left(R_{кр}^2 - 0{,}36\right), \text{ нм.} \tag{8}$$

Указанное уравнение вместе с соотношениями (3), (4) и (5) может быть использовано для прогнозирования величины линейного фрикционного износа I как функции ($p\upsilon$).

На *рисунке 3* приведено сравнение экспериментальных I и рассчитанных указанным образом I^T по уравнению (8) значений интенсивности линейного фрикционного износа для углепластиков на основе фенилона и СВМПЭ.

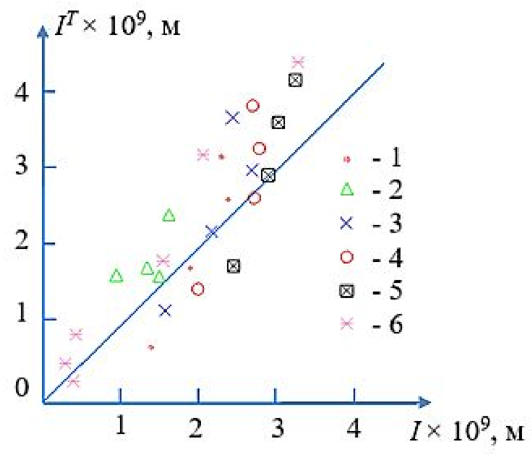

Рисунок 3 – Сравнение экспериментальных I и рассчитанных по уравнению (8) I^T величин интенсивности линейного фрикционного износа I от величины параметра $R_{кр}$ для углепластиков на основе фенилона при давлении p: 1,0 (1), 1,4 (2), 1,6 (3), 1,8 (4) и 2,0 (5) МПа и углепластиков на основе СВМПЭ (6). Прямая линия дает соотношение 1:1

Как можно видеть, получено достаточно хорошее соответствие теории и эксперимента – среднее расхождение I и I^T составляет 22 %, что удовлетворяет требованиям прогнозирования подобных характеристик. Характерно, что данные для углепластиков на основе СВМПЭ (который по своим характеристикам существенно отличается от фенилона) с варьирующимся содержанием углеродного волокна и при $p\upsilon$=const=0,9 МПа·м/с дают соответствие с теорией примерно с таким же средним расхождением. Это говорит об универсальности выбранного параметра $R_{кр}$.

Выводы

Анализ результатов, полученных в данной работе, позволяет разработать методику прогнозирования интенсивности линейного фрикционного износа как функции условий испытаний, таких как давление и скорость скольжения. Эта методика базируется на использовании структурных характеристик материала. В простейшей форме она демонстрирует хорошее соответствие с экспериментальными данными. Это свидетельствует об устойчивости полимерной матрицы к деформации сдвига, что является универсальной характеристикой, применимой для описания процесса фрикционного износа полимерных материалов.

Библиография

1. Фатхуллин А. О возможности применения полимерных композиционных материалов в сельскохозяйственном машиностроении // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. 2016. № 2. С. 21–32.
2. Борисов Г.А., Колодяжная И.Н. Перспективные конструкционные материалы на основе полимеров для применения в сельскохозяйственной технике // Вестник РГАТУ. 2010. № 4. С. 67.
3. Пратт Дж. Антифрикционные свойства полимерных композиционных материалов // Промышленные полимерные композиционные материалы / ред. Н. Ричардсон. М.: Химия. 1980. С. 215–240.
4. Соколов Л.Б., Кузнецов Г.А., Герасимов В.Д. Фенилон – термостойкий ароматический полиамид // Пластические массы. 1967. № 9. С. 21–23.
5. Михайлин Ю.А. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен // Полимерные материалы. 2003. № 4. С. 24–27.
6. Козлов Г.В., Буря А.И., Алоев В.З., Яновский Ю.Г. Структурный аспект межфазной адгезии в углепластиках // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8, № 2. С. 35–38.
7. Блюмен А.В., Семенова М. В., Шейвехман А.О., Эфрос Д.Г. Методика расчетной оценки износостойкости поверхностей трения деталей машин. М.: Изд-во стандартов, 1979. 100 с.
8. Буря А.И., Козлов Г.В., Холодилов О.В. Износ и сдвиговая устойчивость углепластиков на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Трение и износ. 2005. Т. 26, № 4. С. 407–411.
9. Буря А.И., Козлов Г.В. Структурные аспекты трения и износа углепластиков на основе фенилона // Трение и износ. 2003. Т. 24, № 3. С. 279–283.
10. Баланкин А.С. Синергетика деформируемого тела. М.: Изд-во Министерства обороны СССР, 1991. 404 с.
11. Сандитов Д.С., Бартенев Г.М. Физические свойства неупорядоченных структур. Новосибирск: Наука, 1982. 259 с.