Д. т. н. **А. М. Михальченков**[1], д. т. н. **И. Н. Кравченко**[2,3] (✉),
к. т. н. **Ю. И. Филин**[1], к. т. н. **И. В. Козарез**[1],
д. т. н. **С. А. Величко**[4], д. т. н. **М. Н. Ерофеев**[2]

[1] *ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет», с. Кокино Выгоничского района Брянской обл., Россия*

[2] *ФГБУН «Институт машиноведения имени А. А. Благонравова Российской академии наук» (ИМАШ РАН), Москва, Россия*

[3] *ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К. А. Тимирязева», Москва, Россия*

[4] *ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарёва», г. Саранск, Республика Мордовия, Россия*

УДК 691.175.5/.8:620.178.169

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА АБРАЗИВНОГО ИЗНАШИВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ С ДИСПЕРСНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ

Описан механизм абразивного изнашивания дисперсно-наполненных композитов на эпоксидной основе, который заключается в удалении противоабразивных частиц наполнителя из общей массы вещества по мере износа матрицы. Нарушение их равновесия происходит путем отрыва, сдвига и оборота в зависимости от параметров силовой схемы нагружения. При этом сила, необходимая для удаления частиц из матрицы, определяется их размером, формой, пространственным расположением, внутренней адгезионной прочностью системы частица — матрица, площадью контакта с матрицей («склейкой»), а также физико-механическими и триботехническими свойствами.

Ключевые слова: *абразивное изнашивание. механизм изнашивания, полимерный композит, адгезионная прочность, износостойкость, эпоксидная матрица, дисперсный наполнитель, силовая схема.*

ВВЕДЕНИЕ

Абразивостойкие композиты представляют собой материалы, в которых частицы наполнителя равномерно распределены внутри эпоксидной составляющей, связаны с ней высокой адгезионной прочностью и имеют твердость, сравнимую или больше твердости фракций изнашивающей среды [1–5]. Так, известны композиты, в которых в качестве наполнителя используют SiO_2 и TiO_2 [6, 7], а изнашивающей средой является почва [8]. Кроме того, твердость частиц наполнителя несравнимо выше твердости материала матрицы. Эти факторы обусловливают определенные особенности процесса абразивного изнашивания такого материала [9, 10]. Между тем имеющиеся в свободном доступе сведения о взаимодействии абразивной среды и поверхности дисперсно-наполненного композита не дают полного представления о процессе изнашивания такого материала.

Цель настоящей работы — исследование механизма абразивного изнашивания полимерных абразивостойких композитов с дисперсным наполнителем и эпоксидной основой в среде с незакрепленным абразивом.

✉
И. Н. Кравченко
E-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Движение детали рабочего органа в массе незакрепленных абразивных частиц сопровождается микрорезанием поверхности рабочего органа с нанесенным на нее композитом, ее пластическим деформированием [11–13], а также, по мнению некоторых исследователей [14, 15], перемещением абразивной фракции по поверхности трения путем ее перекатывания. При этом степень влияния той или иной формы изнашивания на состояние поверхности трения обусловливается эксплуатационными параметрами, силовыми воздействиями, составом изнашивающей среды [16, 17].

Совокупность разных факторов и сложность явлений при работе полимерных композитов в среде с незакрепленным абразивом, а также недостаток информации о процессах их износа затрудняют анализ взаимодействия абразива и поверхности трения. Это ограничивает использование материалов подобного типа в качестве защитных покрытий рабочих поверхностей деталей, эксплуатирующихся в условиях интенсивного абразивного изнашивания.

По мнению авторов статей [18, 19], стойкость дисперсно-наполненного композита к абразивному изнашиванию незначительно зависит от формы и геометрии частиц его наполнителя. В то же время на абразивостойкость влияют взаимное расположение фракций в материале, степень перекрытия траекторий движения частиц абразивной массы по поверхности детали, характер силового взаимодействия фракций наполнителя композита с частицами абразивной массы, механические характеристики компонентов композита. Среди этих параметров определяющее значение имеют условия силового взаимодействия полимерного композита с абразивной средой; другие параметры носят сравнительно постоянный характер и при любой силовой схеме примерно одинаковы.

Как следует из данных [9, 20], превалирующим фактором при абразивном изнашивании является царапающее воздействие частиц абразива поверхности трения (микрорезание). При этом контактные напряжения в области соприкосновения частиц почвы с покрытием и факт их перекатывания на процесс износа существенно не влияют.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования базируются на единичном контактировании частицы абразивной среды и частицы наполнителя композита, так как в этом случае механизм абразивного изнашивания таких частиц можно описать наиболее полно.

При рассмотрении силового взаимодействия частиц абразива с фракциями наполнителя с учетом того, что частицы абразива могут располагаться любой своей частью к наружной рабочей поверхности, за эквивалентную форму составляющих наполнителя следует принять форму шара [10, 11]. Кроме того, как отмечено выше, форма частиц наполнителя незначительно сказывается на абразивной стойкости вещества. При этом нельзя исключать и изменение формы частиц наполнителя в процессе износа из-за истирания.

Следуя вышеизложенным соображениям, в качестве предпосылок для описания процесса изнашивания композита на самотвердеющей клеевой основе, наполненного частицами высокой твердости, положены следующие факторы:

- изнашивание происходит за счет микрорезания поверхности;
- рассматривается единичный контакт частицы наполнителя и фракции почвы;
- частица наполнителя имеет форму шара.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментально установлено, что абразивная износостойкость композита увеличивается по мере снижения его твердости [3, 21]. Это указывает на принципиальное отличие механизма изнашивания композиционного полимерного вещества, обусловленного удалением частиц дисперсного наполнителя по мере истирания эпоксидной матрицы, от механизма изнашивания гомогенных металлических тел. Иначе говоря, изнашивание материала происходит вследствие «вырывания» фракций наполнителя из общего объема материала. Если говорить об износе частиц наполнителя, то он будет незначителен вследствие небольшой разницы в свойствах фракций изнашивающей массы и противоабразивной компоненты композита.

Таким образом, в основу механизма абразивного изнашивания полимерных дисперсно-наполненных материалов положен эффект удаления противоабразивных частиц наполнителя из общей массы вещества по мере износа эпоксидной основы в процессе эксплуатации детали.

Подтверждением выдвинутого положения является несопоставимая разница в качественном состоянии поверхности термоупрочненной стали 65Г и композита (рис. 1). Пример приведен для композита на эпоксидной основе с песчаной составляющей (60 массовых частей) дисперсностью 1 мм, который использовали в качестве защитного покрытия рабочей поверхности плужных лемехов [8]. При увеличении рис. 1 на фрагменте, показанном на рис. 2, отчетливо прослеживается повышенная разрыхленность покрытия, что указывает на высокую степень удаления частиц противоабразивной составляющей композита друг от друга.

Рассмотрим схему механизма изнашивания поверхности композита при перемещении по ней незакрепленного абразива. При формировании покрытия частицы наполнителя в результате тщательного перемешивания в период подготовки композита будут распределены по всему объему примерно одинаково (рис. 3). В процессе перемещения абразивных частиц изнашивающей среды по поверхности трения композита будет происходить прежде всего истирание матрицы, так как она обладает более низкой твердостью, чем частицы наполнителя.

По мере эксплуатации выступающий над рабочей поверхностью объем частицы все время будет увеличиваться, а прочность ее удержания

Рис. 1. Состояние поверхностей композита (*1*) и металла детали (*2*, сталь 65Г) после эксплуатации (долотообразная часть плужного лемеха после обработки 10 га супесчаных почв)

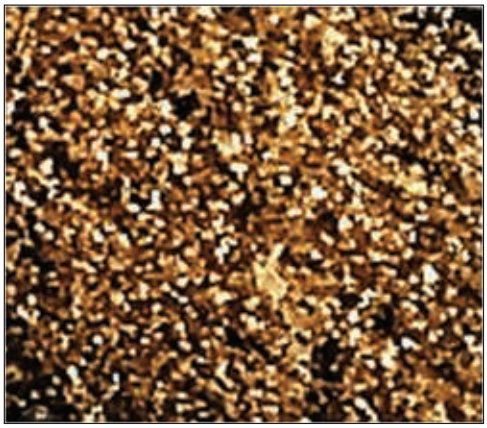

Рис. 2. Поверхность композита с удаленными друг от друга частицами песка

в композите будет, соответственно, снижаться из-за уменьшения площади «склейки» и, соответственно, падения адгезионной прочности (рис. 4, зона «склейки» выделена утолщенной линией). При этом силовое воздействие на частицу будет возрастать (см. рис. 4, *б*, *в*) и в конечном итоге произойдет ее удаление из общего объема композита.

В подтверждение к полученным результатам на рис. 5 показана поверхность композита с песком (60 массовых частей) после ее изнашивания в почвенной массе; четко прослеживаются зоны царапания (резания) покрытия абразивными частицами почвы. Прорезанные канавки расположены под определенным углом к плоскости контакта и распределяются не по всей поверхности, а прерываются и затем появляются вновь. Такое расположение канавок относительно горизонтали («лисьи норы») объясняется тем, что изнашивающая среда перемещается по поверхности под некоторым углом. Прерывание зоны резания связано с тем, что частицы почвы, взаимодействующие с поверхностью композита, в результате контактирования с фракциями наполнителя изменяют свой вектор перемещения.

Исходя из результатов проведенных исследований, подтвержденных экспериментально, нагружение частицы наполнителя от воздействия фракций истирающей массы можно представить силовой схемой, показанной на рис. 6. Согласно этой схеме, а также с учетом случайных

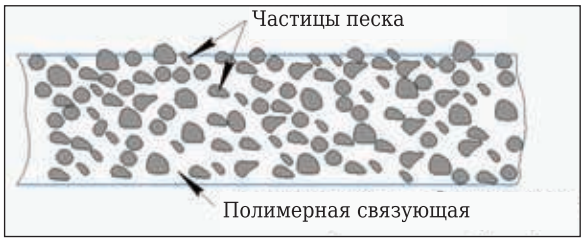

Рис. 3. Схематическое изображение расположения частиц в композите

факторов при движении изнашивающих фракций удаление частиц наполнителя из общей массы композита определяется силой, способной оторвать, сдвинуть или обернуть эту частицу, т. е. на-

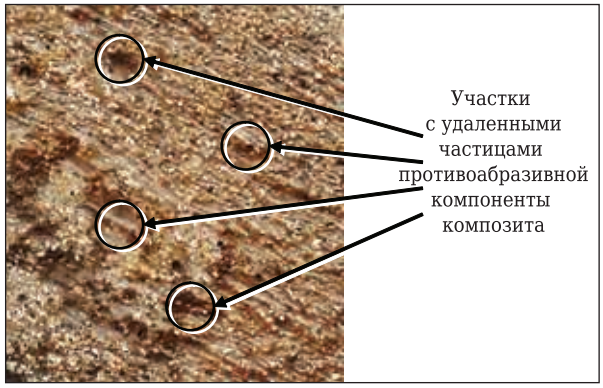

Рис. 5. Изнашивание композита с удалением частиц наполнителя и образованием заглублений («лисьих нор»)

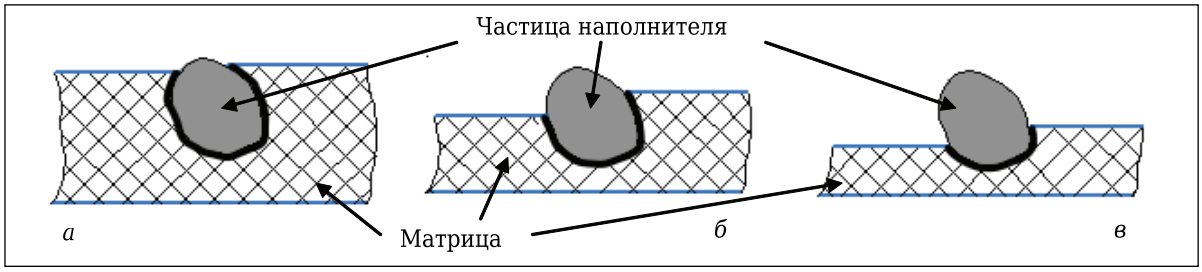

Рис. 4. Схема расположения частицы наполнителя по мере изнашивания связующего: *а* — в начальный период; *б* — в процессе истирания; *в* — перед удалением из матрицы

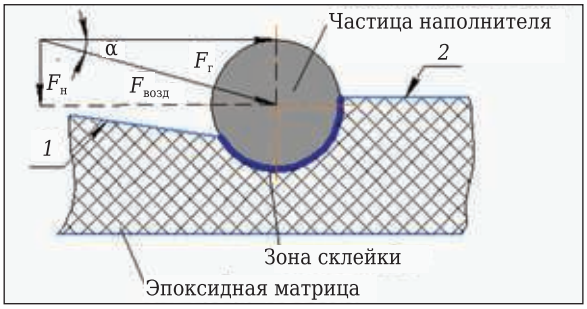

Рис. 6. Схема нагружения частиц наполнителя от воздействия абразивной среды: $F_{возд}$ — сила, действующая со стороны частицы изнашивающей среды; $F_н$ — нормальная сила; $F_г$ — горизонтальная сила; α — угол перемещения абразивной частицы; *1* — поверхность трения матрицы после воздействия частиц почвы; *2* — поверхность матрицы до воздействия частиц почвы за определенный промежуток времени

рушить ее равновесие. В свою очередь, такая сила будет определяться адгезионной прочностью системы частица — матрица, фракцией наполнителя, площадью ее контакта с матрицей («склейкой»), формой и пространственным расположением частицы в матрице, ее физико-механическими и триботехническими свойствами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Механизм абразивного изнашивания полимерных дисперсно-наполненных композитов в среде с незакрепленным абразивом заключается в удалении противоабразивных частиц наполнителя из общей массы вещества по мере износа эпоксидной основы. При этом удаление частиц из композита может происходить путем отрыва, сдвига и поворота в зависимости от параметров силовой схемы их нагружения.

Библиографический список

1. ***Кац, Г. С.*** Наполнители для полимерных композиционных материалов : справочное пособие / *Г. С. Кац, Д. В. Милевски* ; под ред. П. Г. Бабаевского ; пер. с англ. — М. : Химия, 1981. — 736 с.

2. ***Краснов, А. П.*** О систематизации нанонаполнителей полимерных композитов / *А. П. Краснов, В. Н. Адериха, О. В. Афоничева* [и др.] // Трение и износ. — 2010. — Т. 31, № 1. — С. 93–108.

3. ***Кочергин, Ю. С.*** Влияние дисперсных наполнителей на износостойкость эпоксидно-каучуковых композиционных материалов / *Ю. С. Кочергин, В. В. Золотарева, Т. И. Григоренко* // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. — 2017. — № 7. — С. 10–15.

4. ***Мостовой, А. С.*** Эпоксидные композиты с повышенными эксплуатационными характеристиками, наполненные дисперсными минеральными наполнителями / *А. С. Мостовой, А. С. Нуртазина, Ю. А. Кадыкова* // Вестник Воронежского гос. ун-та инженерных технологий. — 2018. — Т. 80, № 3 (77). — С. 330–335.

5. ***Trunilina, A. V.*** Polymer composites with biodegradative properties / *A. V. Trunilina, N. I. Baurova* // Polym. Sci. Ser. D. — 2019. — Vol.12, № 2. — P. 167–169.

6. ***Сугоняко, Д. В.*** Диоксид кремния как армирующий наполнитель полимерных материалов / *Д. В. Сугоняко, Л. А. Зенитова* // Вестник технологического университета. — 2015. — Т. 18, № 5. — С. 94–100.

7. ***Лыга, Р. И.*** Эпоксидные композиты, содержащие диоксид кремния и диоксид титана / *Р. И. Лыга, В. М. Михальчук* // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. — 2021. — № 3. — С. 17–25.

8. ***Михальченков, А. М.*** Практическое применение эпоксидно-песчаных композитов для повышения ресурса и стойкости к абразивному изнашиванию восстановленных штампосварных лемехов / *А. М. Михальченков, А. И. Купреенко, Ю. И. Филин* // Клеи. Герметики. Технологии. — 2018. — № 5. — С. 36–41.

9. ***Шейнман, Е. Л.*** Абразивный износ. Обзор американской печати / *Е. Л. Шейман* // Трение и износ. — 2005. — Т. 26, № 1. — С. 100–111.

10. ***Мусохранов, М. В.*** Физическая модель абразивного изнашивания деталей машин / *М. В. Мусохранов* // Электронный журнал: наука, техника и образование. — 2017. — № 3 (14). — С. 100–104.

11. ***Бутаков, Б. И.*** Повышение долговечности изделий с помощью поверхностного пластического деформирования / *Б. И. Бутаков, В. А. Артюх, О. А. Анисимов, А. Т. Удодов* // Тяжелое машиностроение. — 2006. — № 9. — С. 26–32.

12. ***Бутаков, Б. И.*** Современное состояние проблемы повышения износостойкости деталей поверхностным пластическим деформированием / *Б. И. Бутаков, В. А. Артюх* // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. — 2009. — № 46. — С. 10–13.

13. ***Кравченко, И. Н.*** Технологические основы упрочнения и восстановления деталей термопластическим деформированием при ремонте машин : монография / *И. Н. Кравченко, В. И. Котельников, А. Ф. Пузряков* [и др.]. — М.: Эко-Пресс, 2010. — 252 с.

14. ***Михальченков, А. М.*** Влияние эпоксидно-песчаных покрытий различных составов на процесс изнашивания, специфику износа и ресурс плужных лемехов / *А. М. Михальченков, С. А. Феськов, А. А. Осипов, А. С. Кононенко* // Клеи. Герметики. Технологии. — 2020. — № 1. — С. 45–48.

15. ***Mikhalchenkov, A. M.*** Abrasive resistance of epoxy-based composites with fillers based on tool sharpening sludge / *A. M. Mikhalchenkov, I. V. Kozarez, S. A. Feskov* [et al.] // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. — 2021. — Vol. 50, № 3. — P. 269–273.

16. ***Чичинадзе, А. В.*** Основы трибологии (трение, износ, смазка) / *А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, Н. А. Буше* [и др.] ; под общ. ред. А. В. Чичинадзе. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 2001. — 664 с.

17. ***Дроздов, Ю. Н.*** Прикладная трибология (трение, износ, смазка) / *Ю. Н. Дроздов, Е. Г. Юдин, А. И. Белов* ; под ред. Ю. Н. Дроздова. — М. : Эко-Пресс, 2010. — 604 с.

18. ***Филин, Ю. И.*** Методика определения стойкости к абразивному изнашиванию клееполимерных дисперсных композитов при оптимизации их состава / *Ю. И. Филин, Т. А. Ермакова, М. А. Михальченкова* // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. — 2016. — № 3 (55). — С. 49–55.

19. ***Mostovoy, A. S.*** Effect of finely dispersed chromite on the physicochemical and mechanical properties of modified epoxy composites / *A. S. Mostovoy, A. S. Nurtazina, I. N. Burmistrov, Y. A. Kadykova* // Russ. J. Appl. Chem. — 2018. — Vol. 91, № 11. — P. 1758–1766.

20. ***Сачек, Б. Я.*** Исследование триботехнических свойств и структуры антифрикционных железосодержащих алюминиевых сплавов / *Б. Я. Сачек, А. М. Мезрин, О. О. Щербакова* [и др.] // Трение и износ. — 2018. — Т. 39, № 3. — С. 259–268.

21. ***Mikhalchenkov, A. M.*** The effect of the concentration of components and dispersion of particles of filler of epoxy-sand composite on hardness and its relationship with abrasive wear resistance / *A. M. Mikhalchenkov, A. S. Kononenko, A. A. Tyureva, I. V. Kozarez* // Polym. Sci. Ser. D. — 2021. — Vol. 14, № 1. — P. 17–20. ■

Получено 28.12.21
© А. М. Михальченков, И. Н. Кравченко, Ю. И. Филин, И. В. Козарез, С. А. Величко, М. Н. Ерофеев, 2022 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Петербургская техническая ярмарка (ПТЯ) 2022

26–28 апреля 2022 г. Санкт-Петербург, КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»

В 2022 году в рамках ПТЯ традиционно будет организована актуальная для современной промышленности деловая программа, которая включает Санкт-Петербургский промышленный конгресс, на котором специалисты обсудят новые проекты, технологии, существующие проблемы и перспективы развития отрасли, а также международный конкурс «Лучший инновационный проект и лучшая научно-техническая разработка года», призванный стимулировать деятельность предприятий в области инновационных технологий.

Разделы выставки:

– Металлургия, литейное дело
– Крепеж, метизы, инструмент
– Обработка металлов, машиностроение
– Пластмассы, полимеры, композиты, РТИ
– Охрана труда и средства индивидуальной защиты

ptfair.ru