

УДК 621.893 : 539.62

В. П. Бондаренко, член.-кор. НАН Украины; **И. В. Андреев**, асп.;
В. И. Бондарь, инж.

Институт сверхтвёрдых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев, Украина

ПЕРСПЕКТИВЫ ПОВЫШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ И ПРОТИВОЗАДИРНОЙ СТОЙКОСТИ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ

Fracturing behaviors of the surface stratum of materials for abrasion with weighing materials of the high module at their dry friction and perspectives directions of a heightening of their surface strength and durability to a score are observed.

Объёмное разрушение материала протекает путём возникновения, развития, накопления до критической величины, переплетения и пересечения микродефектов в структуре исходного материала, приводящих к акту макроразрушения детали или конструкции. При этом химический состав материала в местах микро- и макроразрушений остаётся практически неизменным. Относительная простота этих явлений способствовала тому, что проблема объёмной прочности материалов является чётко очерченной и в теоретическом плане получила значительное развитие.

Понятие поверхностного разрушения материалов при трении не является столь однозначным. Здесь нет чёткого представления об объекте разрушения, затруднено прямое наблюдение процессов, происходящих в нём. Кроме того, наблюдается существенное влияние внешней среды на всех этапах протекания процессов деформирования и разрушения. В связи с этим в ранних работах при описании процессов трения разрабатывались упрощённые модели, в которых сложный процесс трения представлялся одним из возможных элементарных актов взаимодействия трущихся поверхностей. Предложенные модели базировались на упругопластической деформации [1], микрорезании [2], сваривании [3], отрыве атомов, плавлении [1], пластическом отеснении [4], образовании плазмы, действии сил Ван-дер-Ваальса и т.п.

Дальнейшее развитие науки о трении было сконцентрировано на глубоком изучении взаимодействия поверхностей на отдельных стадиях процесса: статическом контакте, начале движения, приработке, стационарном режиме, повреждаемости.

Молекулярно-механической природе трения посвящены работы школы И. В. Крагельского, в основу которых положены различные модели шероховатых поверхностей (сферическая, стержневая, коническая, эллипсоидальная и др.). Это позволило количественно оценить фактическую площадь контакта при упругом и пластическом деформировании неровностей контактирующих поверхностей, условия перехода от одного вида деформирования неровностей к другому, условия возникновения и развития подповерхностных дефектов, а также развить представления о процессе схватывания трущихся поверхностей и задиры.

В работах Б. И. Костецкого и его учеников основное внимание уделялось процессам структурного преобразования поверхностей контактирующих материалов при трении. Ими показано, что во многих случаях в поверхностных слоях в процессе трения формируются новые фазы, которые и становятся объектом поверхностного разрушения. На основе этого они утверждали, что поверхностная прочность материала не может быть прямо связана со свойствами исходного материала. Она зависит от свойств вторичных структур, образующихся из исходного материала путём его структурной перестройки и взаимодействия со средой [5].

Оба эти подхода позволяют решать ограниченный круг задач, поскольку они абсолютизируют только один или два из множества фундаментальных трибологических принципов, систематизированных в работе [6]. В ней было предложено, что при выборе материала для пар трения следует учитывать все фундаментальные трибологические принципы, поскольку в современных условиях предъявляются всё более высокие требования к триботехническим материалам: способность работать при высоких скоростях трения-скольжения, контактных давлениях, температурах, воздействии агрессивных сред. Применение в таких условиях традиционных высокопластичных антифрикционных материалов является бесперспективным. Для работы в таких условиях требуются новые материалы. Особенно остро потребность в таких материалах испытывают ракетно- и авиастроение, энергетическое, химическое, нефтяное машиностроение и другие отрасли промышленности.

К высокоскоростным узлам трения относятся торцовые уплотнения, подшипники авиационных систем, турбомеханизмов, ряда агрегатов атомных реакторов, гироскопов, центрифуг, компрессоров и насосов, перекачивающих воду, бензин, керосин и другие маловязкие агрессивные жидкости.

К высоконагруженным парам трения относятся осевые подшипники шарошечных долот, валки холодной и горячей прокатки, торцевые уплотнения химических реакторов и др. В количественном отношении высокоскоростных пар трения значительно больше, чем высоконагруженных. Поэтому основное внимание уделим перспективам повышения работоспособности высокоскоростных пар трения.

Высокоскоростное трение характеризуется интенсивным воздействием на материал в пятнах фактического контакта, в результате которого возникает большой температурный градиент, интенсифицируется пластическая деформация локальных участков на поверхности трения, возможно даже образование поверхностных микротрещин. При этом активизируются процессы массопереноса, взаимодействия с активными элементами рабочей среды, рекристаллизации, термического размягчения и даже оплавления поверхностных слоев. Вследствие развития адгезионных процессов будет возрастать коэффициент трения, а соответственно и растягивающие напряжения, приводящие к возникновению и развитию микротрещин, перпендикулярных вектору скорости. Появлению таких микротрещин будет способствовать снижение прочности поверхностных слоев трущихся материалов из-за их разогрева до высоких температур. Многообразие процессов, происходящих в поверхностных слоях деталей высокоскоростных пар трения, очень затрудняет выбор таких пар.

Много внимания исследованию поведения материалов при высокоскоростном (до 40 м/с) трении в условиях смазки маловязкими жидкостями уделено в работе [6]. Проведённые исследования показали, что в таких условиях высокоэффективными материалами являются композиты микрогетерофазного типа с наполнителями, имеющими высокий модуль упругости и энергию активации движения дислокаций. Они в большей степени относятся к полухрупким и хрупким материалам, чем традиционные, относительно пластичные антифрикционные материалы. Поэтому при их применении, кроме положительных, могут проявляться и отрицательные моменты. Эти материалы менее стойки при ударных нагрузках, требуют использования при их изготовлении дорогостоящих инструментов, компоненты, входящие в их состав, имеют высокую цену. Детали из таких материалов выходят из строя не из-за пластической деформации или микрорезания, а из-за появления и развития на поверхностях трения микротрещин. Роль вторичных структур при этом проявляется в существенно меньшей степени. Особенно это проявляется при экстремальных условиях работы. Так, в результате испытаний было установлено, что материалы ВН и ВНГр позволяют в условиях сухого трения обеспечивать выбег ротора из 12000 об/мин до остановки при торможении насоса на протяжении 180 с.

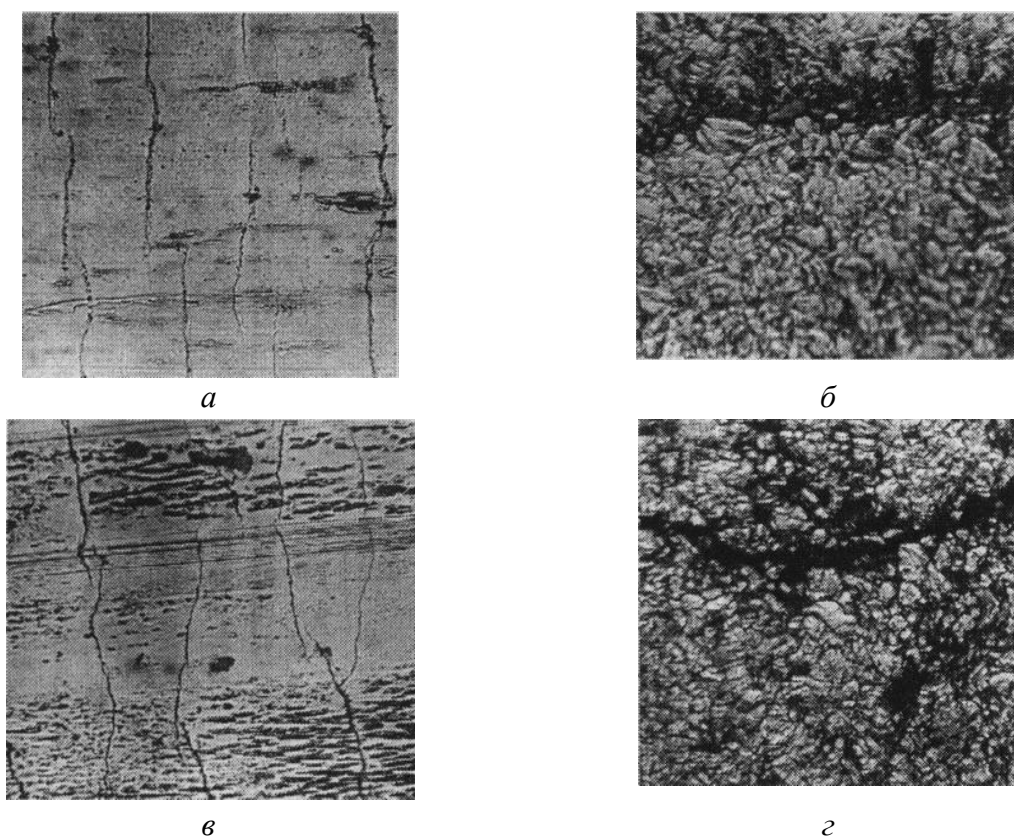


Рис. 1. Состояние поверхности образцов из композитов ВН15 (а, б) и ВН20 (в, г) после трения на протяжении 180 с без смазки по кольцу из композита ВН20 в нетравленном виде (а, в) ($\times 100$) и после травления (б, г) ($\times 1500$).

Однако, как видно из рис. 1, после трёх минут работы пары трения без смазки на поверхности трибоэлемента образуются микротрещины и появляются следы схватывания. При этом увеличение количества пластичной связки приводит к активизации процесса схватывания и мало влияет на развитие микротрещин. Из рис. 1 также видно, что микротрещины располагаются перпендикулярно вектору скорости и возникают они даже в условиях незначительного схватывания. Это свидетельствует о том, что силовой фактор при этом воздействует в меньшей степени, чем термический. Силы, действующие в направлении вектора скорости, способствуют только ориентации микротрещин, но не их возникновению.

Вторичные структуры при этом практически отсутствуют. Поэтому пути повышения эффективности работы таких материалов должны быть совершенно другими, чем при использовании традиционных антифрикционных материалов. Здесь основное внимание следует уделить предотвращению возникновения и развития микротрещин без активизации процессов схватывания. В работе [7] отмечено, что для повышения трещиностойкости материалов нужно увеличить размер частиц высокомодульных наполнителей. Однако предельные размеры этих частиц пока не установлены. Поэтому следует изучить поведение при трении микрогетерофазных композитов с увеличенным до нескольких десятков микрометров размером частиц.

При увеличении размера частиц высокомодульного наполнителя будет увеличиваться толщина прослоек пластичной связки и способность к высокой предельной пластической деформации [8]. А это будет способствовать торможению микротрещин как за счёт более полного развития процесса релаксации напряжений, концентрирующихся у вершин микротрещин, так и за счёт увеличения работы деформации при обходе микротрещиной крупной частицы наполнителя. Оптимальный размер частиц наполнителя будет тогда, когда микротрещине станет энергетически выгоднее пройти через тело крупной частицы, чем обойти её по связующей фазе. Такой размер в настоящее время можно определить только экспериментально. Имеющиеся на сегодняшний день данные по зависимости коэффициента K_{IC} от d_{WC} (рис. 2) свидетельствуют о том, что этот размер должен быть существенно больше 10 мкм. О перспективности этого направления свидетельствуют и работы Г. С. Креймера [9], в которых для объяснения повышенной прочности крупнозернистых твёрдых сплавов предложено в уравнении прочности Гриффитса–Орвала ввести слагаемое K , возрастающее с увеличением размеров частиц карбида вольфрама. К сожалению, предельная величина K Креймером не была установлена. Всё же можно утверждать, что с увеличением размера частиц WC будет возрастать не только объёмная, но и поверхностная прочность.

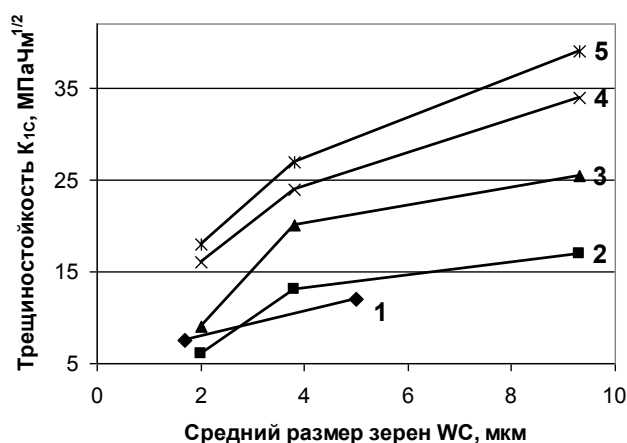


Рис. 2. Зависимость трещиностойкости разрушения от величины зерна WC: 1 – 1-я серия, $V_{V_{Co}} = 10\%$; 2, 3, 4, 5 – 2-я серия соответственно 5, 10, 15, 20 % (по массе) [10].

Однако при увеличении размера частиц WC одновременно с увеличением поверхностной прочности и трещиностойкости, по всей вероятности, в местах выхода на поверхность толстых прослоек связки будут более активно развиваться процессы схватывания, что в пределе может привести к образованию задира и значительному повреждению поверхности трения. Для уменьшения вероятности схватывания, по нашему мнению, наряду с увеличением размера частиц WC можно использовать еще два приёма: упрочнение толстых прослоек связки особомелкозернистыми или наночастицами высокомодульного наполнителя и замена части поверхностного слоя связки на высокоэффективную твёрдую смазку (графит, дисуль-

фид молибдена, серебро и его сплавы, бронзу, бабиты и др.). Количественно и качественно степень этих преобразований поверхности триботехнического композита будут зависеть от условий его эксплуатации необходимую и степень их осуществления можно будет определить только после проведения целого комплекса экспериментальных работ.

Практическая реализация этих приёмов связана со значительными трудностями. Однако преодоление их позволит создать новый класс триботехнических материалов с комбинированной микроструктурой, более эффективно работающих в экстремальных условиях трения. Это позволит полностью удовлетворить потребности современного машиностроения.

Для решения этих задач в ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины имеются все возможности, так как разработаны технологии получения особомелкозернистых и особокрупнозернистых порошков W, WC, (Ti, W)C, а также имеются устройства для ионного травления и нанесения любых покрытий на поверхности деталей пар трения [8–14].

Литература

1. Крагельский И. В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 478 с.
2. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела. Т. 4. – Томск.: Красное знамя, 1948. – 539 с.
3. Боуден Ф. П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. – М.: Машиностроение, 1968. – 543 с.
4. Епифанов Г.И. О двучленном законе трения // Исследования по физике твердого тела. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – 246 с.
5. Поверхностная прочность материалов при трении // Под ред. Б. И. Костецкого. – К.: Техника, 1976. – 296 с.
6. Бондаренко В. П. Композиты для пар трения, смазываемых маловязкими жидкостями. – Дисерт. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук. – Киев, 1987. – 543 с.
7. Бондаренко В. П. Перспективы развития твердых сплавов в Украине // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. научн. тр. – Вып. 9. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2006. – С. 298–305.
8. Бондаренко В. П. Спечені тверді сплави – високоефективні інструментальні та композиційні матеріали // Зб. Прогресивні матеріали і технології. Т. 2 – К.: Наук. думка, 2003. – С. 219–250.
9. Креймер Г. С. Прочность твердых сплавов. – М.: Металлургия, 1971. – 248 с.
10. Лошак М. Г. Прочность и долговечность твёрдых сплавов. – К.: Наук. думка, 1984. – 328 с.
11. Бондаренко В. П., Андреев И. В., Савчук И. В. и др. Особенности восстановления вольфрама из его оксида WO₃ в закрытом реакторе // Сверхтв. материалы. – 2005. – № 2. – С. 35 – 44.
12. Бондаренко В. П., Андреев И. В., Ващенко А. Н. Влияние состава исходных вольфрамсодержащих соединений на процесс восстановления вольфрама в реакторах разных типов // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. научн. тр. – Вып. 8. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2005. – С. 226–230.
13. Бондаренко В. П., Кораблёв С. Ф., Епик И. В. Синтез твердого раствора TiC–WC в водороде, содержащем равновесное количество метана // Огнеупоры и техническая керамика. – 1999. – № 7. – С. 14–16.

Поступила 16.07.07.