

УДК 536.5:621.891:621.9

ИЗНАШИВАНИЕ СИЛИКАТНОГО СТЕКЛА ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ

П.Н. Богданович¹, Д.А. Близнец¹, Д.В.Ткачук²

¹Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

²Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель

WEAR OF SILICA GLASS AT HIGH VELOCITIES

P.N. Bogdanovich¹, D.A. Bliznets¹, D.V. Tkachuk²

¹Belarusian State University of Transport, Gomel

²V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute National Academy of Sciences of Belarus, Gomel

Анализируются закономерности изнашивания силикатного стекла при трении по гладкому стальному контртелу и закреплённому абразиву. Приводятся данные о кинетике и механизмах разрушения поверхностного слоя, характере распространения микротрещин за пределами контактной площадки при обоих видах нагружения. Обсуждаются закономерности влияния нормальной нагрузки и скорости скольжения на глубину распространения микротрещин усталости и интенсивность изнашивания силикатного стекла, и их связь с особенностями фрикционного нагрева поверхностного слоя изнашиваемого тела. Рассмотрены причины появления подповерхностных микротрещин, приводящих к отслаиванию поверхностного слоя стекла.

Ключевые слова: изнашивание, силикатное стекло, микротрещины усталости, интенсивность изнашивания, нагрузка, скорость скольжения.

Regularities of the wear of silica glass at friction against a smooth steel counterbody and fastened abrasive are analyzed. Data on the kinetics and mechanisms of the fracture of the surface layer as well as on the pattern of the propagation of microcracks beyond the contact area are reported for both modes of loading. Regularities of the effect of the normal load and the sliding velocity on the propagation depth of fatigue microcracks and the wear rate of silica glass as well as their relation to peculiarities of the frictional heating of the surface layer of the worn body are discussed. Causes of the appearance of subsurface microcracks that result in the delamination of the glass surface layer are considered.

Keywords: wear, silica glass, fatigue microcracks, wear rate, load, sliding velocity.

Введение

Согласно существующим представлениям, абразивное изнашивание металлов и неметаллических материалов является в основном результатом усталостных процессов, протекающих в тонком поверхностном слое. Стружкообразование и разрушение непрерывно возобновляемых оксидных пленок при фрикционном нагружении металлов вносит значительно менее ощутимый вклад – менее 20% [1]. При трении хрупких материалов этот показатель выше. Для выявления вклада усталостного разрушения в абразивное изнашивание представляет интерес выполнить сравнительный анализ закономерностей изнашивания неметаллических материалов закреплёнными абразивными частицами и при фрикционном нагружении в отсутствие абразива. В этом случае важным обстоятельством является то, что на поверхности трения неметаллического материала отсутствуют оксидные пленки, которые вносят существенный вклад в процессы трения и изнашивания. Поскольку на механизм и интенсивность изнашивания таких материалов существенное влияние оказывают зависящие от режимов нагружения тепловые явления, импульсно протекающие на пятнах фактического контакта сопрягаемых тел, важно изучить влияние нагрузки и скорости скольжения на эти процессы [1]–[3].

1 Методика исследования

Испытания проводились на машине трения, оборудованной системой регистрации температурного поля. Устройство и принцип действия экспериментальной установки подробно описаны в работе [4]. В данной серии экспериментов была реализована схема контакта цилиндрическая поверхность вращающегося диска диаметром 179 мм и шириной 5 мм – пластинка прямоугольного сечения (70x20x2 мм). В качестве исследуемого материала было выбрано силикатное стекло. Для испытаний материалов при трении без абразивных частиц контртело (диск) было изготовлено из стали 45 (твёрдость 170 НВ), а для абразивного изнашивания – из алюминиевого сплава Д16, на поверхность которого шаржированием наносился слой частиц карбида кремния дисперсностью 100 мкм (твёрдость соответствует девятому классу по шкале Мооса). Шаржирование с применением касторового масла осуществлялось после каждого эксперимента. Выбор сплава Д16 обусловлен тем, что оксиды на его поверхности обладают высокой твёрдостью и также выполняют функцию абразива. Кроме того, коэффициент теплопроводности λ сплава Д16 равен 210 Вт/(м·К), что значительно выше, чем стали 45 ($\lambda=46$ Вт/(м·К)). Поэтому при нанесении на поверхность диска из Д16 частиц из карбида

кремния, λ которого значительно ниже, чем металла достигались близкие по теплоотводу условия испытаний обеих пар трения: «стекло – алюминий + карбид кремния» и «стекло – сталь».

Линейная скорость изменялась в интервале 6–60 м/с, а номинальная нагрузка на участок контакта выбиралась из ряда 0,43; 0,87; 1,3; 1,73 Н. Продолжительность изнашивания составляла в среднем 180 с. Интенсивность изнашивания оценивалась по потере массы образца. Исследование характера разрушения поверхностей трения проводилось с помощью конфокального лазерного сканирующего микроскопа LEXT OLS3000 (408 нм), позволяющего получать двумерные изображения поверхности и трехмерные модели.

2 Результаты исследований

Сравнительный анализ результатов исследований показал, что закономерности изнашивания стекла при трении по стали (без абразива) и по закрепленному на алюминиевом диске абразиву принципиально отличаются. Так, массовая интенсивность изнашивания I_m стекла при трении по абразиву снижается почти на порядок с увеличением скорости скольжения v в интервале от 5 до 35 м/с (рисунок 1).

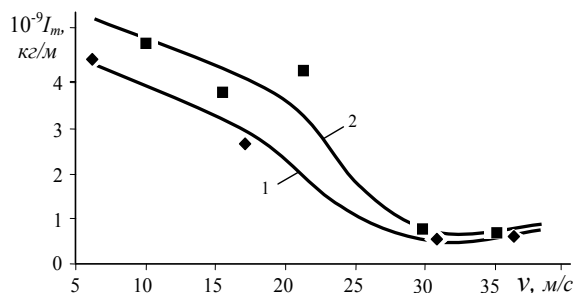


Рисунок 1 – Влияние скорости скольжения на интенсивность абразивного изнашивания стекла при: 1 – $N=0,87$ Н, 2 – $N=1,3$ Н

Это связано с конкурирующим влиянием следующих основных факторов. С одной стороны, увеличение скорости сопровождается уменьшением времени жизни фрикционных связей и глубины внедрения абразивных частиц в изнашиваемый материал. При этом должна уменьшаться глубина бороздок, образующихся за абразивной частицей, и объем деформируемого материала. Кроме того, возрастает объем межконтактного пространства и объем воздуха, участвующего в отводе теплоты из зоны трения, т. е. повышается скорость воздушного потока и растет подъемная сила, разделяющая трущиеся тела. По мере увеличения скорости скольжения усиливается роль воздуха как смазочного материала. Причина в том, что при повышении v и температуры вязкость воздуха заметно возрастает и обеспечивается существование более сплошной

смазочной пленки. В итоге, совокупность описанных явлений приводит к снижению интенсивности абразивного изнашивания.

С другой стороны, повышение v сопровождается ростом интенсивности тепловыделения на пятнах фактического контакта. Это снижает твердость стекла в областях, прилегающих к этим пятнам, и способствует росту глубины внедрения абразивных частиц и контактных деформаций, что уменьшает сопротивление материала изнашиванию. По мере увеличения скорости скольжения роль этого фактора в изнашивании усиливается. При трении без абразива наблюдается обратная зависимость: увеличение скорости скольжения до $v=40$ – 45 м/с не вызывает существенного изменения I_m , а для более высоких значений v характерен резкий рост интенсивности изнашивания (рисунок 2).

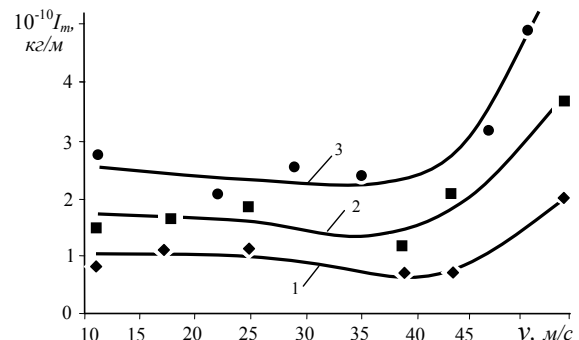


Рисунок 2 – Влияние скорости скольжения на интенсивность изнашивания стекла при трении по стали без абразива при: 1 – $N=0,87$ Н; 2 – $N=1,3$ Н; 3 – $N=1,7$ Н

Причина в том, что в отличие от шероховатого абразивного слоя стальное контртело увлекает в зону трения значительно менее толстый слой воздуха. Это снижает его охлаждающую способность, и температура на фрикционном контакте становится доминирующим фактором, определяющим интенсивность изнашивания стекла. Несмотря на такое различие в интенсивности отвода теплоты из зоны трения, при абразивном изнашивании I_m в 5–40 раз (в зависимости от скорости скольжения) выше, чем при трении без абразива. По-видимому, основным фактором, определяющим такое различие, является различие глубины относительного внедрения частиц абразива и выступов поверхности стального контртела. Абразивные частицы внедряются на большую глубину в изнашиваемый материал, чем выступы стального контртела. В итоге интенсивному деформированию и малоциклового усталости подвергается более толстый слой стекла. Кроме того, наличие острых граней у абразивных частиц и малый радиус закругления вершин является причиной высоких контактных напряжений, которые повышают вероятность стружкообразования. Существенное различие

средних значений I_m при обоих видах изнашивания указывает на то, что вклад стружкообразования превышает 20% – значение, которое считается предельно возможным.

Зависимости I_m от нормальной нагрузки для обоих видов испытания подобны: увеличение N сопровождается ростом интенсивности изнашивания стекла. По мере увеличения нагрузки зависимость $I_m(N)$ становится более существенной за счет роста вклада стружкообразования и увеличения глубины внедрения абразивных частиц в изнашиваемый материал.

Поскольку интенсивность изнашивания материалов в значительной мере определяется толщиной подлежащего усталостному разрушению слоя, было изучено влияние параметров нагружения на глубину h распространения микротрещин усталости (рисунок 3). Оценка этого параметра проводилась с помощью лазерного микроскопа LEXT3000 путем сканирования световым пучком дна микротрещины и прилегающей к ней поверхности изнашиваемого тела.

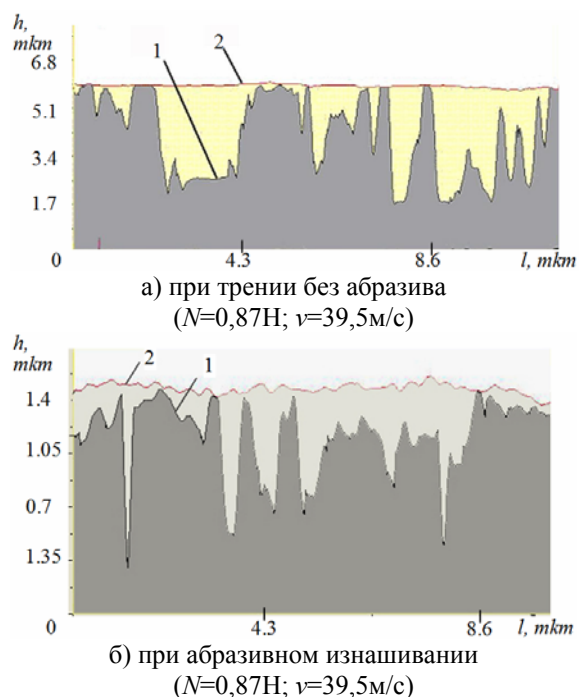


Рисунок 3 – Профиль дна усталостной микротрещины (1) и поверхности трения (2) стекла

Видно, что в обоих случаях глубина распространения микротрещин изменяется крайне неравномерно по их длине: даже на соседних участках значение h может различаться почти на порядок: на полосе скольжения (продольной бороздке) микротрещина может распространяться на глубину 1 мкм и более, а на отдельных участках она выходит на поверхность трения ($h \rightarrow 0$). Таким образом, изменение h по длине трещины носит скачкообразный характер.

При выбранных режимах нагружения маловероятно пластическое оттеснение стекла на дно

микротрещины и обеспечение, вследствие этого, выхода кривой 1 (профиля дна) на поверхность трения. Прорастание микротрещин на большую глубину на отдельных участках, по-видимому, вызвано двумя основными причинами: неравномерностью распределения механических свойств изнашиваемого материала по поверхности трения и локализацией тепловой энергии в отдельных, прилегающих к пятнам контакта, микрообъемах. Этому способствует неравномерный характер распределения давления по ширине контактной площадки.

Глубина и характер распространения усталостной трещины при трении по стальному диску и по абразиву существенно различаются. При абразивном изнашивании трещина распространяется на глубину до 1 мкм, что в 3 – 5 раз меньше, чем при трении по стали. Малая глубина микротрещин, по-видимому, связана с быстрым удалением верхнего слоя стекла вследствие стружкообразования. Кривая, описывающая профиль дна микротрещины, содержит значительно более острые и чаще расположенные пики при абразивном изнашивании.

Поскольку увеличение скорости скольжения вызывает уменьшение интенсивности абразивного изнашивания стекла, можно полагать, что при этом должна снижаться и глубина микротрещин усталости, образующихся на поверхностях трения. Однако исследования абразивного изнашивания стекла показали, что в экспериментах наблюдается обратная картина: при повышении v глубина h микротрещин возрастает (рисунок 4).

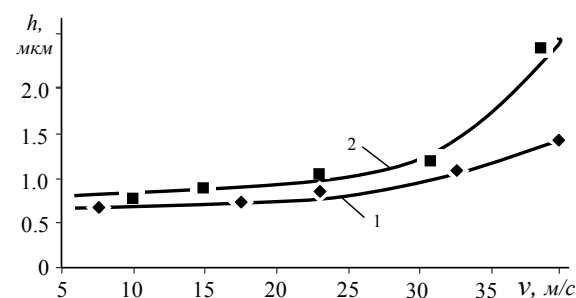


Рисунок 4 – Влияние скорости на глубину распространения микротрещин усталости при абразивном изнашивании: 1 – $N=0,87\text{Н}$; 2 – $N=1,3\text{Н}$

Следует отметить, что в данном случае h представляет собой среднюю статистическую глубину проникновения трещины в объем изнашиваемого материала. Приведенная зависимость $h(v)$ обусловлена, по-видимому, импульсным фрикционным нагревом локальных участков контакта [5], [6]. Увеличение скорости скольжения сопровождается ростом температурных всплесков на пятнах фактического контакта и, как следствие, повышением температурных напряжений, которые, суммируясь с контактными

напряжениями, обеспечивают распространение микротрещин на большую глубину.

Приведенные данные позволяют полагать, что процесс абразивного изнашивания силикатного стекла определяется стружкообразованием, частотой и скоростью роста микротрещин, а также усталостными явлениями, протекающими в объемах, значительно меньшего масштаба. Наиболее вероятными областями усталостного разрушения являются полосы контакта изнашиваемого материала с вершинами абразивных частиц.

При трении по стальному контртелу (без абразива) зависимости $I_m(v)$ и $h(v)$ подчиняются одному закону (рисунки 2 и 5). Это свидетельствует о доминирующей роли усталостного разрушения стекла в процессе изнашивания.

Запись кинетики усталостного разрушения поверхностного слоя стекла свидетельствует о том, что значения скорости роста микротрещин в различные периоды их развития сильно различаются. Так, достигнув определенной длины, микротрещина длительное время сохраняет свои размеры. По-видимому, в течение этого инкубационного периода в прилегающей к ее вершине области происходит аккумуляция дефектов структуры, а при достижении их критической плотности наблюдается импульсное увеличение

длины. Таким образом, процесс развития микротрещин состоит из циклически повторяющихся периодов роста и аккумуляции дефектов, первый из которых несоизмеримо мал по сравнению со вторым.

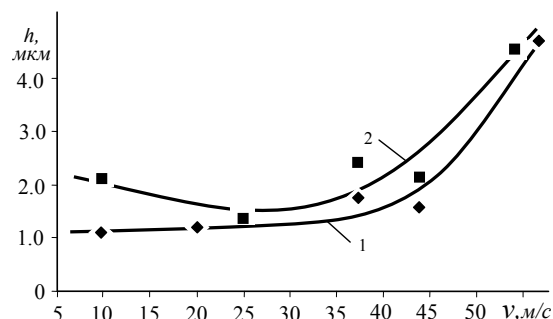


Рисунок 5 – Влияние скорости скольжения на глубину распространения микротрещин усталости при трении без абразива:
1 – $N=0,87Н$; 2 – $N=1,3Н$

При малых (до 12 м/с) скоростях скольжения трение по абразиву сопровождается хрупким разрушением стекла на локальных участках поверхности трения, которые расширяются в результате скола материала по краям и образуют полосы разрушения, вытянутые вдоль направления вектора скорости (рисунок 6, а).

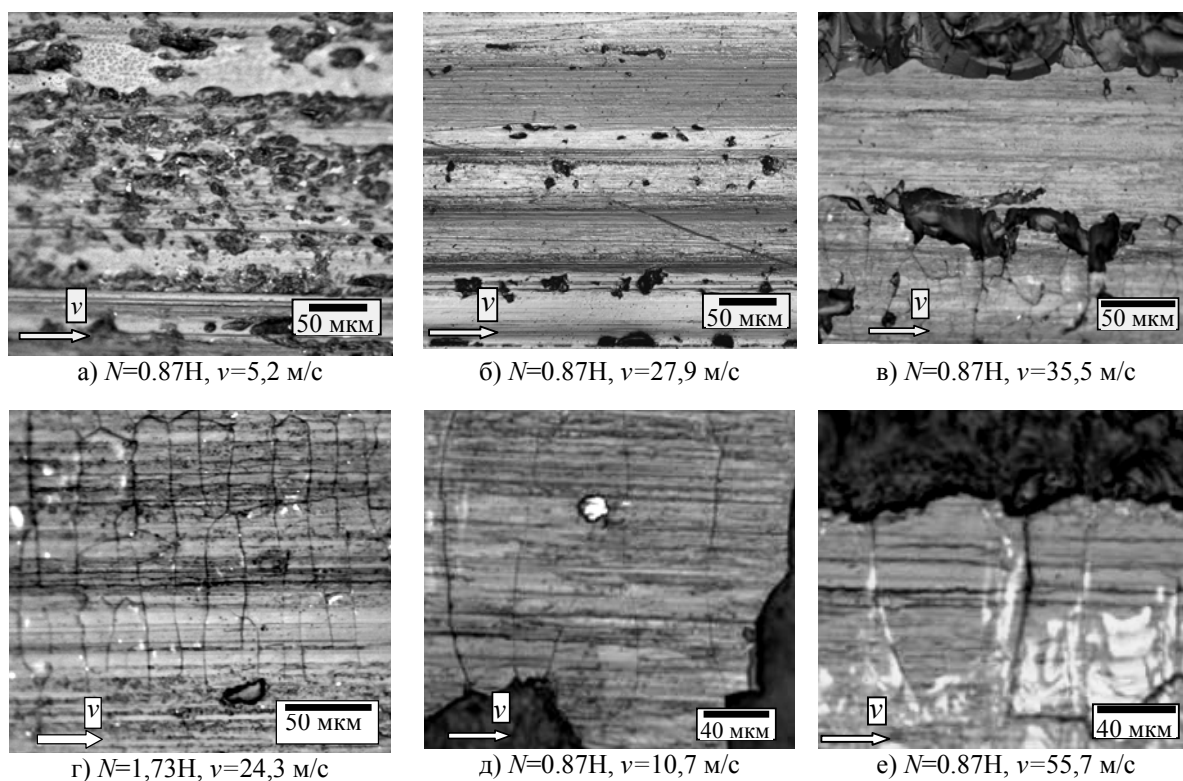


Рисунок 6 – Поверхность силикатного стекла после абразивного изнашивания (а – г) и трения без абразива (д, е)

С повышением скорости до ~ 30 м/с (интервал v зависит от нагрузки) абразивные частицы внедряются на меньшую глубину, вследствие повышения температуры на пятнах контакта уменьшается твердость и склонность изнашиваемого материала к хрупкому разрушению. По этой причине создаются условия для выглаживания поверхности трения, полосы хрупкого разрушения встречаются значительно реже и большая часть поверхности трения остается гладкой (рисунок 6, б).

Более существенный вклад в изнашивание вносит малоцикловая усталость, вызванная упругопластическими деформациями – на поверхности трения появляются микротрещины длиной несколько микрометров. При $v > 30$ м/с или меньших скоростях, но более высоких нагрузках наблюдается переход к усталостному изнашиванию, на поверхности трения появляются ориентированные перпендикулярно вектору скорости микротрещины, длина которых составляет десятые доли миллиметра (рисунки 6, в и г). Появление микротрещин связано с высокими температурными напряжениями и увеличением вероятности термоусталостного разрушения стекла [5], [6].

При высоких значениях v (~ 40 м/с) длина поверхностных трещин может превышать 1 мм. При трении без абразива изнашиваемый материал подвергается более высокому тепловому воздействию. Поэтому микротрещины усталости образуются и достигают такой же длины при низких скоростях скольжения и нагрузках (рисунок 6, д).

Практически во всем интервале нагрузок и скоростей при трении по стальному контртелу, а также при высоких значениях N и v при трении по абразиву возникают подповерхностные микротрещины. Об их наличии свидетельствуют чередующиеся цветные полосы вблизи границ разрушенных участков (рисунок 7, а, см. в направлении стрелки). Возникновение этих полос обусловлено разложением света на переменной толщины поверхностном слое стекла, отделяемого подповерхностной трещиной. На рисунок 7, б представлено трехмерное изображение этого участка, на котором видна расположенная параллельно поверхности трения на расстоянии около 1 мкм от нее подповерхностная микротрещина (показана стрелкой). При возникновении такой микротрещины происходит ее рост и слияние с поверхностными трещинами, отслаивание поверхностного слоя от основного материала, изгиб этого слоя под действием внутренних напряжений и хрупкое диспергирование с образованием частиц износа.

Появление подповерхностных микротрещин связано с расположением максимально напряженной точки и максимума температуры не на поверхности трения, а в объеме изнашиваемого материала под контактной площадкой [7].

Подтверждением этого положения являются результаты исследования температурных полей при резании сапфира, в которых показано, что максимум температуры и термических растягивающих напряжений достигается за пределами контактной площадки [8], [9]. Так, на рисунке 8 видно, что область наибольшей температуры (свыше 60°C) находится на расстоянии в несколько десятых долей миллиметра от поверхности контакта абразивного диска с сапфиром.

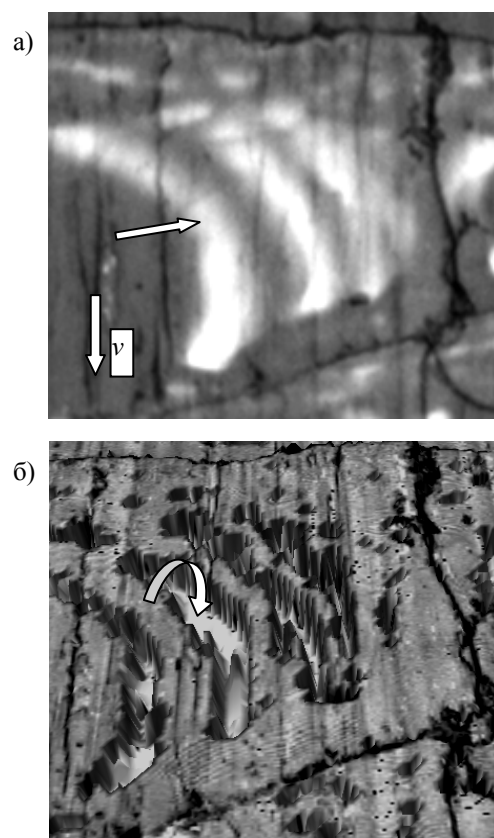


Рисунок 7 – Подповерхностные трещины при трении при $N=0,87\text{Н}$ и $v=39,5$ м/с

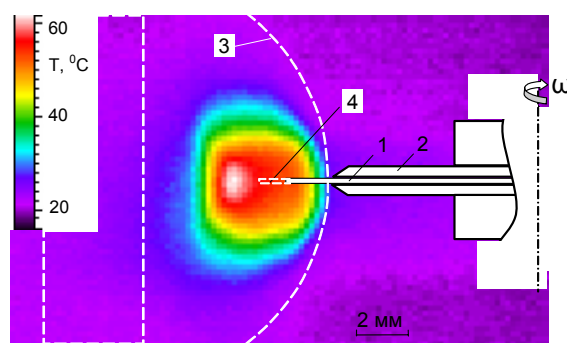


Рисунок 8 – Температурное поле (ИК изображение) в зоне контакта сапфир–абразив и прилегающих областях при $v = 23,6$ м/с и $N = 0,65\text{Н}$: 1 – диск с абразивным слоем; 2 – прижимные фланцы; 3 – контур пластинки из сапфира; 4 – контур диска

Исследования показали, что кинетика разрушения поверхностного слоя силикатного стекла при трении по абразиву и трении по гладкому стальному контртелу существенно не различаются. При трении по абразиву вначале на поверхности трения образуются вызванные стружкообразованием слабо заметные бороздки, на дне которых появляются микротрещины. Впоследствии скалывание материала по краям микротрещин и выкрашивание материала между ними приводит к образованию пятен усталостного разрушения, которые в дальнейшем сливаются в полосы, вытянутые в направлении скольжения. С течением времени чаще всего разрушается одна из боковых границ полосы, и эта граница смещается перпендикулярно вектору скорости. После достижения определенной ширины эта полоса поверхности трения не разрушается, а усталостному разрушению подвергается близко расположенный участок (полоса) поверхности трения. При этом ранее разрушенная полоса выглаживается, а затем на ее поверхности вновь появляются микротрещины. В дальнейшем описанный цикл повторяется.

Таким образом, процесс абразивного изнашивания представляет собой последовательное перемещение чередующихся разрушенных и гладких полос в направлении, перпендикулярном вектору скорости скольжения. При трении по гладкому стальному контртелу процесс изнашивания заметно не отличается от описанного. Отличительная особенность лишь в том, что при трении по стали стружкообразование вносит несоизмеримо меньший вклад на начальном этапе изнашивания, а при высоких значениях N и v интенсивность изнашивания стекла в значительной мере определяется адгезионным разрушением поверхностного слоя. При трении по абразиву в исследуемом диапазоне N и v адгезионное изнашивание не наблюдалось.

Заключение

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что процессы изнашивания при трении по гладкому контртелу и закрепленным абразивным частицам сопровождаются как подобными, так и существенно различающимися явлениями и закономерностями. Так, для обоих видов нагружения характерны рост интенсивности изнашивания с повышением нормальной нагрузки, доминирующая роль усталостного разрушения в изнашивании материала, крайне неравномерная глубина распространения микротрещины на различных участках ее длины, периодический характер разрушения поверхностного слоя,

появление микротрещин усталости под поверхностью трения. В отличие от трения по гладкому контртелу, при трении по абразиву интенсивность изнашивания на порядок ниже, вклад стружкообразования в изнашивание соизмерим с усталостным разрушением, отсутствует адгезионное изнашивание, значительно меньше глубина распространения микротрещин, повышение скорости скольжения приводит к снижению интенсивности изнашивания, появление микротрещин под поверхностью трения наблюдается при многократно более высоких нагрузках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богданович, П.Н. Трение и износ в машинах / П.Н. Богданович, В.Я. Прушак. – Минск : Вышэйшая школа, 1999. – 376 с.
2. Температура на зерне алмазного круга в процессе шлифования / В.В. Рогов [и др.] // Синтетические алмазы. – 1978. – № 3. – С. 49–53.
3. Chandrasekar, S. Flash temperature measurements in high-speed friction contact / S. Chandrasekar, T.N. Farris, B. Bhushan // Trans. ASME. J. of Tribology. – 1990. – Vol. 112, № 3. – P. 535–540.
4. Богданович, П.Н., Экспериментальная установка для изучения тепловых процессов в контакте твердых тел / П.Н. Богданович, В.М. Белов, Д.В. Ткачук // Материалы, технологии, инструменты. – 2006. – Т. 11, № 4. – С. 89–97.
5. Bogdanovich, P.N. Analysis of temperature fields at high-speed friction of inorganic materials to control their friction-induced thermal fatigue / P.N. Bogdanovich, D.A. Tkachuk // Materials Science. – 2002. – Vol. 8, № 2. – P. 46–49.
6. Богданович, П.Н. Тепловые и термомеханические явления в контакте скольжения / П.Н. Богданович, Д.В. Ткачук // Трение и износ. – 2009. – Т. 30, №3. – С. 214–229.
7. Саверин, М.М. Контактная прочность материалов в условиях одновременного действия нормальной и касательной нагрузок / М.М. Саверин. – М. : Машгиз, 1946. – 148 с.
8. Богданович, П.Н. Температурные поля, развивающиеся при резании сапфира и алмаза / П.Н. Богданович, Д.А. Близнец, Д.В. Ткачук // Инженерно-физический журнал. – 2009. – Т. 82, №3. – С. 569–575.
9. Bogdanovich, P.N. Temperature distribution over contact area and «hot spots» in rubbing solid contact / P.N. Bogdanovich, D.A. Tkachuk // Tribologie International. – 2006. – Vol. 39, № 11. – P. 1355–1360.

Поступила в редакцию 21.09.10.