

# РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ КОНТАКТНОМ НАГРУЖЕНИИ

Павел БОГДАНОВИЧ\*, Денис ТКАЧУК\*\*, Дмитрий БЛИЗНЕЦ\*

\* Кафедра “Материаловедение и технология материалов” Белорусского государственного университета транспорта, ул. Кирова 34, 246653 Гомель, Беларусь

\*\* Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, ул. Кирова 32а, 246050 Гомель, Беларусь

[bogdanovich@belsut.gomel.by](mailto:bogdanovich@belsut.gomel.by)

**Резюме:** Приводятся данные о кинетике, механизмах разрушения и интенсивности изнашивания силикатного стекла и сапфира при их высокоскоростной абразивной обработке. Обсуждаются закономерности влияния нагрузки, скорости перемещения абразивных частиц и времени распиливания сапфира и монокристалла алмаза на температурные поля в зоне резания и прилегающих областях. Показано, что при высоких скоростях максимум поверхностной температуры смещается за пределы контактной площадки, а температурные напряжения вызывают терморастрескивание сапфира и стекла в этой области. При распиливании кристалла алмаза температура в зоне резания может достигать значений, достаточных для его локальной графитизации.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Распиливание и абразивная обработка сверхтвердых материалов сопровождаются импульсным воздействием на материал механических и тепловых полей, которое приводит к усталостному разрушению прилегающих к зоне резания областей. В случае превышения критических режимов нагружения процесс разрушения становится неуправляемым. Это может заметно ухудшить качество готовых изделий. Например, при изготовлении изделий из сапфира, стекла и алмазов могут возникать дополнительные дефекты, трещины, термораскалывание, возможны графитизация алмаза и ухудшение цветовых характеристик изделия (Дурасов, 1964; Petrokovets et al., 1998; Bogdanovich и Tkachuk, 2001; Лолодзе и Бокучава, 1967). Поэтому важно иметь данные о температурных и механических полях в зоне обработки при различных технологических режимах и их роли в разрушении твердых и сверхтвердых материалов.

## 2. МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Исследования проводились на специально разработанной машине трения, позволяющей моделировать процессы распиловки и абразивной обработки твердых и сверхтвердых материалов при скоростях скольжения абразивного зерна по обрабатываемой поверхности, достигающих 100 м/с.

В качестве объекта исследования выбирались пластинки 1 из силикатного стекла (75×26×1 мм), диски из сапфира (18×1 мм) и кристаллы алмаза. При изучении абразивного изнашивания была реализована схема контакта обрабатываемая пластинка 2 (диск) – цилиндрическая поверхность вращающегося диска 1, на которую шаржированием наносился слой абразивных частиц (рис. 1). В испытаниях материалов на

изнашивание диаметр диска стального составлял 127 мм, а толщина – 5 мм. При распиливании применялись диски из бронзы БрОФ6,5-0,15 диаметром 76 мм и толщиной 0,05±0,07 мм, шаржированные алмазным порошком АСН20/14.

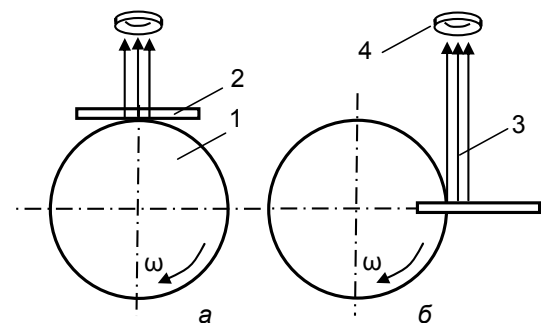


Рис. 1. Схемы контакта образца и диска при абразивном изнашивании (а) и распиливании (б)

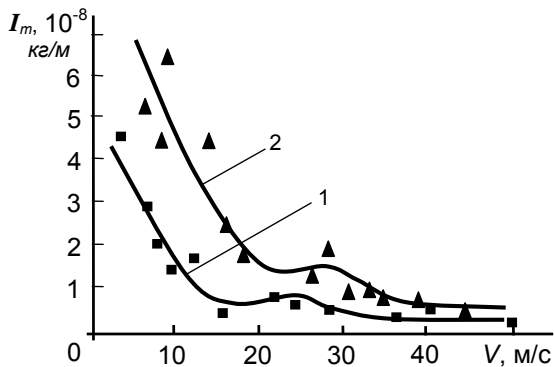
В качестве приемника 4 теплового излучения 3 использованы тепловизор IR SnapShot и разработанный оптико-электронный преобразователь.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Скорость скольжения теплового источника (в нашем случае абразивного зерна) по поверхности изнашиваемого материала оказывает определяющее влияние на температуру пятна фактического контакта. Поэтому представляло интерес изучить влияние указанных факторов на температурные поля в зоне резания и закономерности разрушения материалов.

Исследования показали, что увеличение скорости скольжения  $V$  вызывает снижение массовой интенсивности изнашивания  $I_m$ , а при  $V = 25 \div 30$  м/с кривая  $I_m(V)$  имеет максимум (рис. 2). Такой характер зависимости  $I_m(V)$  связан с конкурирующим влиянием

ряда факторов. В частности, повышение скорости до  $\approx 30$  м/с вызывает рост толщины воздушного слоя и увеличение зазора между сопрягаемыми телами. При этом уменьшается глубина внедрения абразивных частиц и, как следствие, снижается интенсивность изнашивания силикатного стекла, что подтверждается падением сопротивления перемещению сопрягаемых тел.



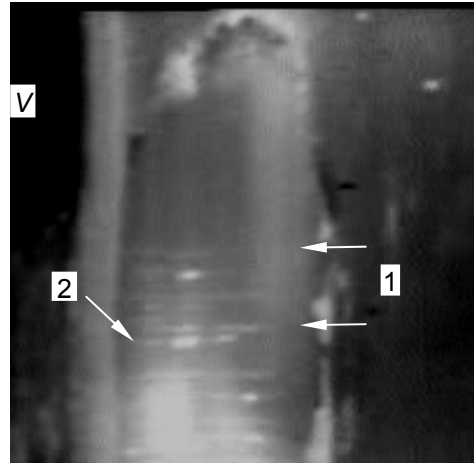
**Рис. 2.** Зависимости массовой интенсивности изнашивания силикатного стекла от скорости при: 1 –  $N = 1.74$  Н; 2 –  $N = 2.16$  Н

С повышением скорости количество генерируемой при трении теплоты возрастает, что приводит к локальному размягчению изнашиваемого материала, росту глубины внедрения  $h$  абразивных частиц в изнашиваемый материал и повышению  $I_m$ . Третий фактор связан с диссипацией тепловой энергии в процессе трения. С увеличением  $V$  уменьшается время между соседними вступлениями в контакт абразивных частиц с изнашиваемым материалом, что должно способствовать более интенсивному теплообразованию. С другой стороны, повышение скорости вращения диска увеличивает прокачку воздуха через зону контакта, что способствует более интенсивному охлаждению сопрягаемых тел. Последний фактор становится доминирующим при высоких скоростях. С повышением нормальной нагрузки  $N$  интенсивность теплообразования возрастает, снижается роль газодинамического эффекта, и координата минимума интенсивности изнашивания смещается в область меньших скоростей скольжения.

Нормальная нагрузка оказывает влияние на интенсивность изнашивания в основном через посредство глубины внедрения абразивных частиц в изнашиваемый материал и температуры пятен контакта, которая определяет глубину внедрения частиц и механические свойства изнашиваемого материала. С повышением нагрузки  $I_m$  вначале незначительно снижается (переход от хрупкого разрушения стекла к малоцикловой усталости), а затем возрастает. Это связано с ростом  $h$  и толщины интенсивно деформируемого и подлежащего разрушению слоя стекла.

Для выявления природы разрушения силикатного стекла и оценки влияния на этот процесс температуры были проведены испытания при  $V = 80$  м/с и нагрузке

1,74 Н. Запись кинетики разрушения стекла при трении по стали показала, что этот процесс при высокоскоростном нагружении является результатом одновременной реализации двух типов разрушения. Первый из них – локальное плавление материала с последующим его оттеснением к выходу трущихся тел из контакта: на вершинах выступов материал поверхностного слоя стекла плавится и, формируясь в капли, стекает вдоль дорожки трения в направлении вектора скорости (рис. 3, стрелки 1).



**Рис. 3.** К механизму изнашивания силикатного стекла

Второй механизм изнашивания – усталостное разрушение материала, локализующееся вблизи зон плавления (рис. 3, стрелка 2). Этот процесс вызван циклически повторяющимся импульсным воздействием температурных и механических контактных напряжений. Здесь определяющая роль в разрушении поверхностного слоя принадлежит температурному градиенту (может достигать тысячи градусов на миллиметр), являющемуся причиной высоких термических напряжений в областях, прилегающих к зоне локального плавления изнашиваемого материала.

Запись усталостного разрушения свидетельствует о том, что процесс роста микротрещин носит периодический характер. Появившись и достигнув определенной длины, микротрещина длительное время не изменяет свои размеры, затем наблюдается быстрое увеличение длины и после этого повторная стабилизация ее размеров. В период стабилизации возможно самозалечивание микротрещины, протекающее, по-видимому, за счет сжимающих напряжений в изнашиваемом материале впереди внедрившейся микронеровности контртела – абразивной частицы. После самозалечивания наблюдается повторное увеличение длины микротрещины, при этом ее рост на отдельных участках может протекать по траектории, отличающейся от первоначальной. Впоследствии ослабленный материал, находящийся между первоначальной и новой траекториями роста микротрещин, отделяется от основы, измельчается и удаляется с поверхности трения.

По мере увеличения скорости скольжения микрорельеф изношенной поверхности изменяется,

наблюдается переход от одного доминирующего вида изнашивания к другому (рис. 4). При низких  $V$  температура в контакте не достигает высоких значений и поэтому материал образца подвергается в основном абразивному (полосы скольжения обозначены стрелкой 1) и усталостному разрушению (трещины обозначены стрелкой 2), которые являются следствием циклического воздействия температурных и контактных напряжений. Имеет также место хрупкое скалывание материала (см. в направлении 3).

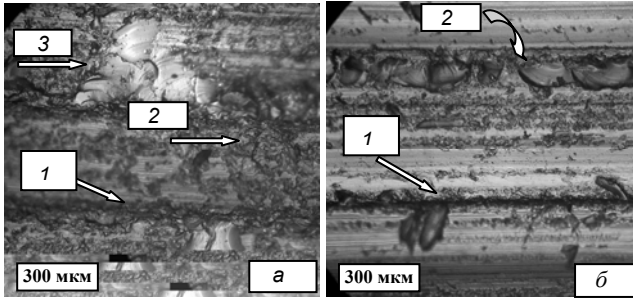


Рис. 4. Поверхности дорожек трения стекла после абразивного изнашивания при: а -  $V = 26$  м/с; б -  $V = 80$  м/с

С увеличением скорости до 55 м/с температура на пятнах контакта возрастает и повышается роль малоциклового усталости, что приводит к выглаживанию изнашиваемой поверхности и снижению роли хрупкого разрушения. При  $V = 80$  м/с и выше поверхность дорожки трения имеет более сглаженный рельеф, однако материал по краям глубоких бороздок (рис. 4, б, стрелка 1) разрушается хрупко (стрелка 2).

Характер разрушения материалосерединок и периферийных участков дорожки трения различен. Поскольку максимум температуры фрикционного нагрева смещается к границе выхода абразива из контакта, эта область разрушается более интенсивно (рис. 5).

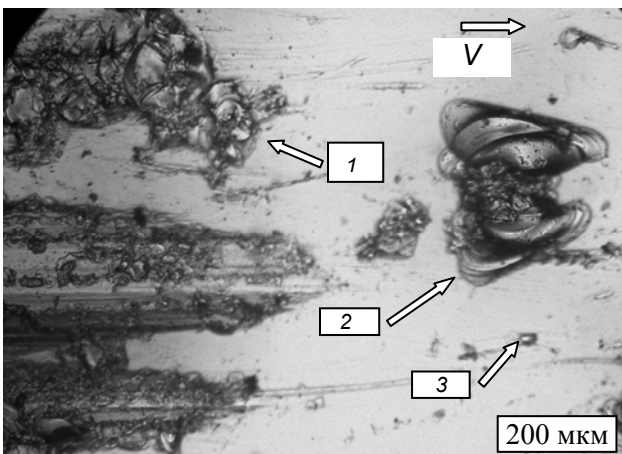


Рис. 5. Поверхность дорожки трения стекла в зоне выхода из контакта после абразивного изнашивания при  $V = 80$  м/с

Здесь температурные напряжения настолько велики, что вызывают терморастрескивание материала даже за пределами контактной площадки – на прилегающем к ее границе участке образуется цепочка

разрушений сферической формы (рис. 5, стрелка 1). На значительном расстоянии от границы контакта материал образца подвергается терморастрескиванию (см. в направлении 2). За пределы дорожки трения выносятся расплавленное стекло, оседающее на поверхности образца в виде капель (рис. 5, стрелка 3).

Для сапфира характерны подобные описанным выше закономерности изнашивания. Зависимость  $I_m(V)$  изображается кривыми с минимумом (рис. 6). Однако, в отличие от стекла, у сапфира проявляется анизотропия усталостной прочности:  $I_m$  в двух взаимно перпендикулярных направлениях различается в 8÷10 раз.

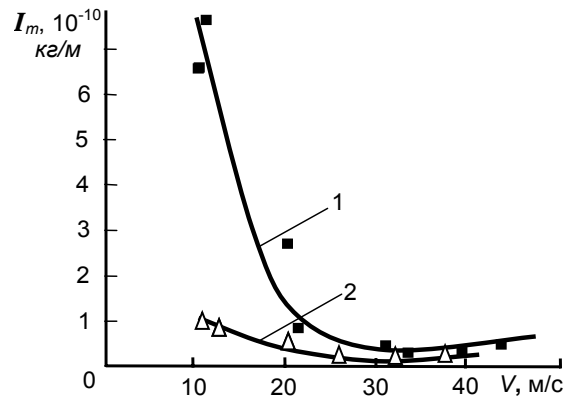


Рис. 6. Зависимость массовой интенсивности абразивного изнашивания сапфира от скорости скольжения в двух взаимно перпендикулярных направлениях при  $N = 1,3$  Н

Возможность разрушения за пределами контактной площадки подтверждается исследованиями распределения поверхностной температуры  $T_{пов}$  по поверхности пластинки сапфира: она достигает максимума не в зоне контакта абразивный инструмент – сапфир, а на расстоянии  $\approx 1$  мм перед ней (область белого цвета на рис. 7). Эффект смещения максимума  $T_{пов}$  может быть обусловлен тем, что участки сапфира, непосредственно прилегающие к бронзовому диску, быстро охлаждаются.

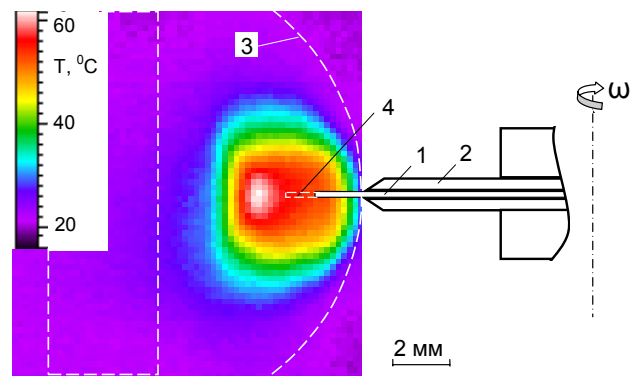
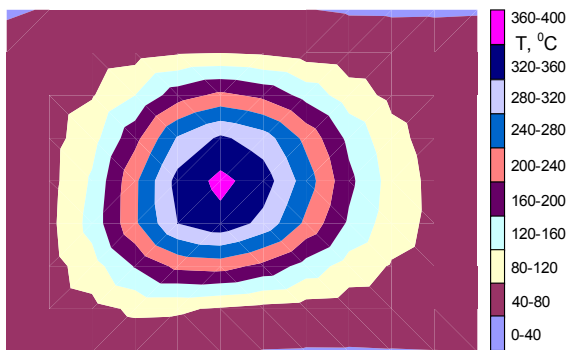


Рис. 7. Тепловизионное ИК изображение и схема распиловки пластинки сапфира при  $V = 23,6$  м/с и  $N = 0,65$  Н: 1 – распиловочный диск; 2 – прижимные фланцы; 3 – контур пластинки из сапфира; 4 – контур распиловочного диска

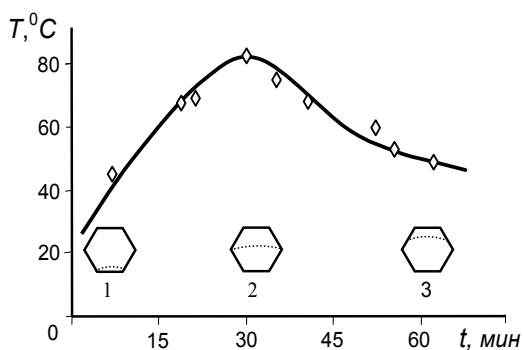
В отличие от сапфира, скорость распиливания алмаза на порядок ниже, т.к. его высокая твердость обуславливает не только малую глубину внедрения

абразивных частиц, но и приводит к износу и закруглению их режущих кромок. Это является причиной интенсивного тепловыделения и повышения температуры в зоне резания.  $T_{пов}$  алмаза при близких режимах нагружения в 2÷10 раз превышает  $T_{пов}$  сапфира (рис. 8). Температура нагрева алмаза определяется не только режимами резания, но и напряженным состоянием и анизотропией свойств монокристалла. Температура, достигающая 400 °С и более, косвенно подтверждает возможность локальной, вызванной всплшками температуры на пятнах контакта, графитизации алмаза, протекающей при температурах  $\approx 600$  °С.



**Рис. 8.** Температурное поле в зоне резания и прилегающих областях распиливания алмаза

На поверхности диска регистрируются нагретые участки после выхода их из зоны резания. Это выступающие за контур диска крупные абразивные частицы или отколовшиеся частицы обрабатываемого материала. Их температура достигает 90 °С. Они могут повторно вступать в контакт, не успев охладиться до комнатной температуры и способствуя аккумуляции теплоты в кристалле и повышению его температуры.



**Рис. 9.** Типичная кинетическая кривая максимальной температуры в зоне распиливания монокристалла алмаза

В начальный момент распиливания, когда глубина внедрения диска мала (рис. 9, 1), температура алмаза незначительно превышает температуру окружающей среды. Далее глубина внедрения диска в алмаз растет, увеличивается дуга контакта и абразивная частица дольше находится в контакте с алмазом. Это приводит к большему тепловыделению и повышению температуры алмаза (рис. 9, 2), которое продолжается

до тех пор, пока увеличивается дуга контакта. После достижения максимума  $T$  снижается, т.к. дуга контакта становится короче (рис. 9, 3) и уменьшается время нахождения частиц в контакте с алмазом.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлены закономерности нагрева и разрушения стекла, сапфира и алмаза при высокоскоростной абразивной обработке. В зоне контакта реализуются периодически повторяющиеся процессы: плавление стекла на пятнах контакта и усталостное разрушение, вызванное совместным действием контактных и температурных напряжений. С увеличением скорости вращения диска происходит переход от хрупкого усталостного изнашивания стекла и сапфира к абразивному, а интенсивность изнашивания имеет минимум.

При скоростях  $> 80$  м/с температурные напряжения достигают такой величины, что материал подвергается терморастрескиванию даже за пределами дорожки трения, что обусловлено смещением максимума температуры за пределы контактной площадки.

Изучены температурные поля в зоне распиливания сапфира и алмаза. Увеличение нагрузки, частоты вращения диска и времени распиливания сапфира приводит, при практически неизменной форме термограмм, к возрастанию максимальной температуры. Температура в зоне резания алмаза в 2÷10 раз выше, чем сапфира, и может достигать значений, при которых возможна локальная графитизация алмаза.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дурасов В.М. (1964), О некоторых физических процессах, происходящих при механической обработке алмазов, *Сб. тр. ВНИИГознака*, № 5, 33 – 34.
2. Petrokovets M.I., Bogdanovich P.N., Tkachuk D.V. (1998), Thermal instability of friction pairs, *Problemy Eksploatacji*, V. 30, № 3, 189–198.
3. Bogdanovich P.N., Tkachuk D.V. (2001), The influence of overlapping factor on temperature field in friction units, *Tribologia*, № 2, 191 – 199.
4. Лолодзе Т.Н., Бокучава Г.В. (1967), *Износ алмазов и алмазных кругов*, Москва.

#### FAILURE OF MATERIALS AT DYNAMIC CONTACT LOADING

**Abstract:** The paper reports data on the kinetics, failure mechanisms, and wear rate of silicate glass and sapphire in high-speed abrasive machining. Regularities of the effect of the load, the velocity of abrasive particle movement, and the duration of the cutting of sapphire and the diamond monocrystal on temperature fields in the cutting zone and adjacent areas are discussed. It is shown that at high velocities the maximal surface temperature position shifts outside the contact site and temperature stresses cause the thermal cracking of sapphire and glass in this zone. When cutting a diamond monocrystal the temperature in the cutting zone can reach values sufficient for its local graphitization to occur.