

УДК 621.937.025.7 : 534.13

Д. А. БЛИЗНЕЦ, П. Н. БОГДАНОВИЧ, О. И. ЯКУБОВИЧ

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПИЛОВКИ ТВЕРДЫХ И СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассматриваются явления, которые могут приводить к появлению трещин при распиливании заготовок тонким бронзовым диском. Определены частоты собственных колебаний инструмента и критическая сила, соответствующая потере устойчивости плоской формы диска. На основе анализа результатов экспериментов предложен способ, позволяющий снизить вероятность образования трещин при распиловке твердых материалов.

Ключевые слова: распиловка, алмаз, собственные частоты, устойчивость, трещины.

Введение. Процесс распиливания кристаллов в классическом представлении представляет собой абразивное изнашивание заготовки твердыми частицами абразива, закрепленными на поверхности распиловочного диска [1]. Имеются исследования, посвященные как совершенствованию механического разделения заготовок на части, например, путем создания вынужденных колебаний диска [2], так и разработке новых методов – гидроабразивной обработке высокоскоростным потоком жидкости с абразивными частицами [3], лазерному термораскалыванию заготовок из твердых и сверхтвердых материалов [4]. Вновь разрабатываемые методы имеют ряд недостатков (большая толщина реза, значительные потери сырья, трудности управления формой поверхности, разделяющей заготовку на части и др.). Поэтому до настоящего времени наиболее широко распространенной остается механическая распиловка шаржированным диском.

Одной из основных проблем метода механического разделения заготовок является искривление формы диска при повышенных нагрузке и скорости вращения. В этом случае возможно взаимодействие боковых поверхностей пропиленной заготовки с криволинейной поверхностью диска, вызывающее импульсно изменяющиеся циклические температурные и механические напряжения, которые приводят к появлению трещин усталости в заготовке, распространяющихся перпендикулярно поверхности распила, и ухудшению ее качества [5]. Наличие трещин и областей выкрошивания в материале заготовки требует удаления на последующих операциях достаточно толстого слоя. При этом возрастают не только потери сырья, но и затраты времени и средств на дополнительную обработку.

Целью представленной работы является обоснование режимов нагружения распиловочного диска при разделении заготовок лейкосапфира и алмазота.

Методика проведения испытаний. Распиловка лейкосапфира осуществляется на высокоскоростной установке по схеме распиловочный диск – то-

рец образца (рисунок 1) [6]. Образцы сапфира 2, представляющие собой пластинки цилиндрической формы диаметром 18 мм и высотой 1 мм, были установлены на оправке 3 и закреплены посредством прижимного устройства 1. Распиловочный диск 4 диаметром 76 мм и толщиной 0,05–0,07 мм изготавливался из бронзы БрОФ 6,5–0,15. С помощью технологической оснастки цилиндрическая поверхность диска шаржировалась алмазным порошком АСН20/14 (дисперсность 14–20 мкм).

Перед началом и в процессе испытания каждые 2–3 мин на режущую кромку диска накатывали (шаржировали) смесь алмазного порошка и касторового масла. Линейная скорость точек рабочей поверхности распиловочного диска в испытаниях по распиловке образцов сапфира и силикатного стекла изменялась в интервале 10–30 м/с. Номинальная нагрузка на диск выбиралась из ряда 0,22; 0,65; 0,43; 0,87 Н. Продолжительность испытаний составляла в среднем 60 с или испытания проводились до потери целостности образца.

Схема контакта распиловочного диска с монокристаллом алмаза представлена на рисунке 2. Распиловочный диск 3, абразивный порошок, технология и периодичность нанесения применялись те же, что и в случае распиловки сапфира. Алмазную заготовку 1 размечали, закрепляли в оправке 2, ориентировали, затем производили подрез заготовки и распиливание. Частота вращения шпинделя станка n составляла 12000 об/мин, что соответствует линейной скорости точки рабочей поверхности диска $v = 42,6$ м/с. Нагрузку N изменяли в пределах 0,43–2,4 Н. Продолжительность испытаний определялась технологическим временем полной распиловки кристалла алмаза.

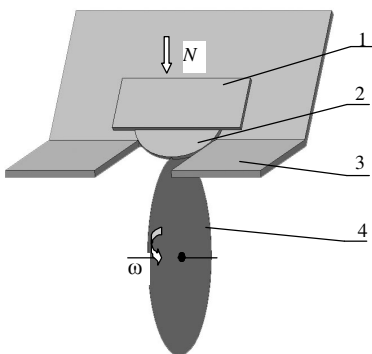


Рисунок 1 – Схема контакта образца и диска при распиловке сапфира:

- 1 – прижимной механизм; 2 – образец;
- 3 – оправка; 4 – распиловочный диск

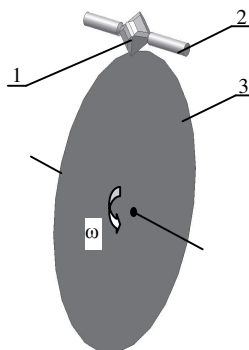


Рисунок 2 – Схема контакта алмаза и диска при распиловке:

- 1 – кристалл алмаза; 2 – оправка;
- 3 – распиловочный диск

Конечно-элементная модель. С целью определения частот собственных колебаний режущего инструмента, а также критической силы по критерию устойчивости диска, была создана конечно-элементная модель вала с режущим диском в среде программного комплекса ANSYS [7]. Для этого выбран

один из способов создания объемной модели, в соответствии с которым по координатам построены ключевые точки и линии, определяющие форму половины поперечного сечения вала, включающего его ось симметрии. Из получившихся фигур созданы площади. Чтобы получить объемную модель, построенное сечение развернуто вокруг оси вращения (в нашем случае – ось X).

Для решения задачи в области линейных упругих деформаций материалам назначены свойства с помощью опции (Structural – Linear – Elastic – Isotropic). В разработанной модели использованы два материала, бронза и сталь (режущий диск – бронза, все остальные объемы – сталь). Для первого материала (бронза) модуль Юнга принят равным $E_1 = 9,5$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu_1 = 0,35$, плотность $\rho_1 = 8900$ кг/м³, для стали аналогичные параметры таковы: модуль Юнга $E_2 = 200$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu_2 = 0,35$, плотность $\rho_2 = 7800$ кг/м³.

При создании конечноэлементной модели использован 8-узловой объемный элемент SOLID185. Конечноэлементная сетка была создана в автоматическом режиме. Визуальный контроль показал, что наиболее интересная для анализа выступающая область режущего диска была разбита на 6 частей в радиальном направлении, что достаточно для расчета изгиба диска. Общее число конечных элементов составило 73000, а общее число уравнений – 230000. Полученная конечноэлементная модель приведена на рисунке 3.

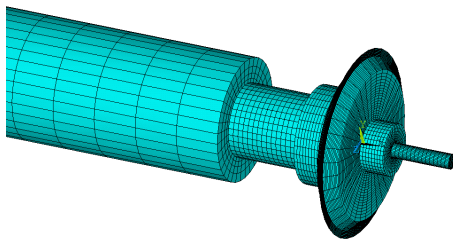


Рисунок 3 – Конечноэлементная модель вала с диском

При задании граничных условий было запрещено перемещение четырех точек вала, расположенных в сечениях, соответствующих местам размещения подшипников, в радиальном направлении. Также для двух точек сечения подшипника, ближнего к месту расположения режущего диска, запрещалось перемещение вдоль оси X . Тем самым были созданы условия закрепления, соответствующие реальному деформированию вала в подшипниках.

Анализ частот собственных колебаний. При расчете частот собственных колебаний вала с диском была назначена опция нахождения 10 наименьших частот колебаний из диапазона от 0 до 10000 Гц.

Моделирование процесса вращения геометрической модели распиловочного узла показало, что первая собственная частота проявляется на скорости вращения, соответствующей 1250 Гц. Как видно из рисунка 4, на котором показана форма колебаний вала, соответствующая указанной частоте, деформации конструкции в этом случае определяются жесткостью вала. Амплитуды колебаний диска при этом незначительны. Последующие частоты колебаний 1959 и 2321 Гц также связаны с деформацией вала с диском в сборе. И лишь при частотах 2686 и 2862 Гц появляются формы колебаний, обусловленные главным образом изгибом диска (рисунок 5).

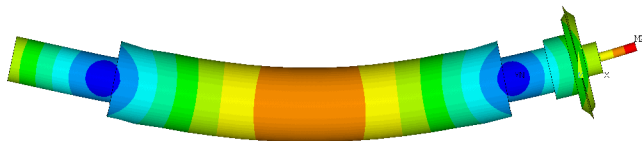


Рисунок 4 – Собственная форма колебаний вала с диском, соответствующая частоте 1250 Гц

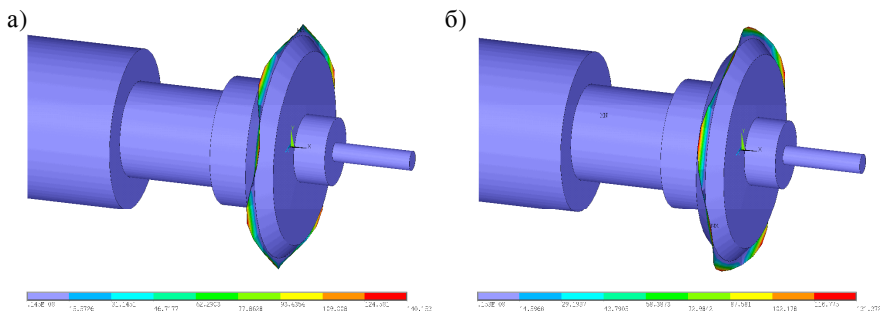


Рисунок 5 – Формы колебаний, соответствующие собственным частотам:
a – 2686 Гц; *б* – 2862 Гц

Найденным частотам собственных колебаний соответствуют резонансы при вынужденных колебаниях. При приложении нагрузки на этих частотах в реальном процессе обработки резко возрастает вероятность разрушения распиловочного диска по причине задира или неконтролируемого разрушения заготовки. Полученные результаты расчетов говорят о том, что возникновение резонансов при распиловке материалов определяется в первую очередь деформациями вала. Жесткость диска достаточна для обеспечения необходимой точности распиловки. Поскольку максимальные частоты вращения вала, при которых осуществляется разрезание, соответствуют 100 Гц, то возникающие в процессе резания случайные колебания, обусловленные несовершенствами в подшипниковых узлах, не будут приводить к резонансам.

Определение критической силы. Для нахождения критической силы, при которой возникает неплоская форма устойчивого равновесия диска, к его ободу была приложена сосредоточенная сила, равная 1 Н, лежащая в плоскости диска и проходящая через его центр. Результаты расчетов показали, что минимальный коэффициент запаса устойчивости в этом случае равен 5,5. Он соответствует значению критической силы 5,5 Н, при которой появляется форма неустойчивого равновесия, показанная на рисунке 6, *a*. При дальнейшем увеличении силы прижатия диска к обрабатываемому объекту возможно появление новых форм неустойчивого равновесия, которые показаны на рисунках 6, *б–е* и отличаются разным количеством волн на поверхности диска.

Полученный результат показывает, что при силах прижатия, не превышающих 5 Н, в результате незначительных колебаний приложенной нагрузки (как по величине, так и по направлению), приводящих к выходу точек диска из его плоскости, он будет восстанавливать свою первоначальную форму. В частности, такая ситуация будет наблюдаться при взаимодействии с сапфиром и алмазом ввиду значительно большей твердости распиливаемого контртела по сравнению с бронзовым распиловочным диском. Однако эти деформации носят упругий характер, и реализуются только в момент действия нагрузки. В зоне выхода из контакта распиловочный диск будет упруго восстанавливать свою первоначальную форму.

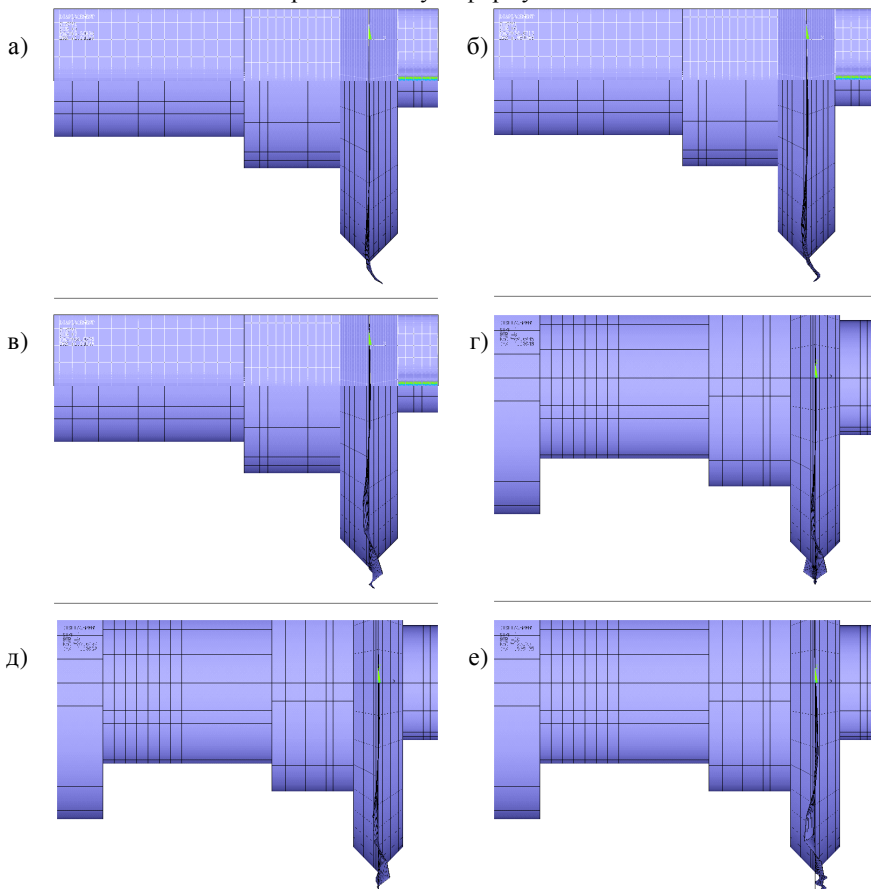


Рисунок 6 – Формы потери устойчивости распиловочного диска при различных нагрузках в области контакта:
a – 5,5 Н; *б* – 34,6 Н; *в* – 66,0 Н; *г* – 69,7 Н; *д* – 87,6 Н; *е* – 123,7 Н

Результаты экспериментов. Проведение модельного эксперимента позволило подтвердить верность выбранных диапазонов нагрузки и скорости вращения в области контакта и убедиться в том, что коэффициент запаса по скорости вращения распиловочного диска из условия недопущения резонанса равен 12, а по прикладываемой нагрузке (исходя из условия устойчивости равновесия) – 2,5–5.

Упругие деформации диска и образование волнообразной поверхности, которая в процессе разделения заготовки вступает в кратковременный контакт с вершинами выступов боковой поверхности распила, наблюдаются также при $P < 5,5$ Н и $n < 1250$ Гц. Одним из подтверждений этого является возникновение пятен переноса бронзы с диска на поверхность распила заготовки. Циклически повторяющиеся напряжения при реализации такого контакта могут привести к разрушению слоя заготовки, прилегающего к поверхности распила. В частности, возникновение усталостных микротрещин и пятен выкрошивания материала на боковых поверхностях распила обнаружено при разделении заготовок из силикатного стекла, лейкосапфира и алмазота (рисунок 7).

Причина в том, что в местах контакта импульсно повышается температура и касательные напряжения. Многократное циклическое воздействие этих факторов приводит к образованию микротрещин в поверхностном слое заготовки и, в конечном итоге, к выкрошиванию материала в области их высокой концентрации.

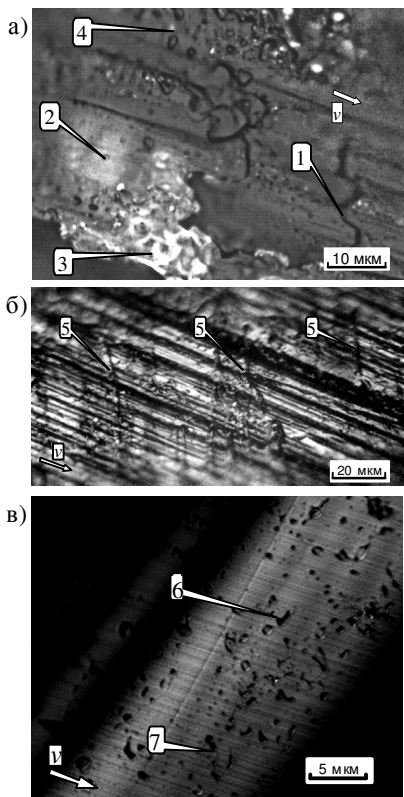


Рисунок 7 – Разрушение боковой поверхности распила образцов
 а – силикатное стекло;
 б – лейкосапфир; в – алмазот

Так, на распиленной поверхности силикатного стекла отмечены усталостные трещины, ориентированные перпендикулярно вектору скорости перемещения точек рабочей поверхности диска (рисунок 7, а, стрелка 1). Имеет также место интерференционное разложение света на клине из приподнятого материала (рисунок 7, а, стрелка 2), следы локального плавления стекла (рисунок 7, а, стрелка 3) и адгезионного переноса меди (рисунок 7, а, стрелка 4). Распиленная поверхность лейкосапфира содержит микротрещины, ориентированные под углом к вектору скорости v (рисунок 7, б, стрелка 5).

Поверхность алмазота покрыта мелкими абразивными полосами, появившиеся в результате взаимодействия абразивных зерен с поверхностью образца. Присутствуют очаги выкрашивания (рисунок 7, в, стрелка б) и микротрещины, соединяющие эти очаги (рисунок 7, в, стрелка 7).

Возникновение в процессе распиливания описанного вида дефектов приводит к необходимости удаления слоя дорогостоящего материала, толщина которого определяется глубиной проникновения дефектов.

Заключение. Проведенный анализ показывает, что снижение вероятности появления и глубины распространения дефектов в поверхностном слое распиливаемой заготовки из твердого или сверхтвердого материала, может быть достигнуто путем уменьшения коэффициента трения распиловочного диска по боковой поверхности распила.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Епифанов, В. И.** Технология обработки алмазов в бриллианты : учеб. для сред. проф.-тех. училищ / В. И. Епифанов, А. Я. Песина, Л. В. Зыков. – М. : Высш. шк., 1982. – 351 с.

2 **Ямная, Д. А.** Технология распиливания твердых и сверхтвердых кристаллов при сообщении заготовке вынужденных колебаний / Д. А. Ямная, М. Г. Кисилёв // Сборник научных работ студентов Республики Беларусь "НИРС 2011". – Минск : Изд. центр БГУ, 2012. – С. 271–276.

3 **Axinte, D. A.** Abrasive waterjet cutting of polycrystalline diamond: A preliminary investigation / D. A. Axinte [et al.] // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2009. – Vol. 49, № 10. – P. 797–803.

4 **Никитюк, Ю. В.** Физические закономерности лазерного термораскалывания силикатных стекол и алюмооксидной керамики: дис. ... канд. физ.-мат. наук 01.04.21 / Ю. В. Никитюк. – Минск, 2009. – 166 с.

5 **Близнец Д. А.** Изнашивание неорганических материалов при распиловке абразивным инструментом / Д. А. Близнец, П. Н. Богданович // Трение и износ. – 2016. – № 6. – С. 721–727.

6 **Богданович, П. Н.** Экспериментальная установка для изучения тепловых процессов в динамическом контакте твердых тел / П. Н. Богданович, Д. А. Близнец, Д. В. Ткачук // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2009. – № 8. – С. 17–22.

7 **Shimanovsky, A.** Modeling of the Pantograph-Catenary Wire Contact Interaction / A. Shimanovsky, V. Yakubovich, I. Kapliuk // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 134. – P. 284–290.

D. A. BLIZNETS, P. N. BOGDANOVICH, V. I. YAKUBOVICH
Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

FINITE-ELEMENT MODELING OF THE HARD AND ULTRA-HARD MATERIAL SAWING PROCESS

There are considered the phenomena that can lead to the appearance of cracks at a cutting process of blanks with a thin bronze disc. The eigenfrequencies of the instrument and the critical force corresponding to the stability loss of the disk flat shape are determined. Based on the analysis of the experimental results, there was proposed a method allowing to reduce the probability of crack formation at solid materials cutting.

Получено 25.07.2017