

УДК 621.923

**С.И. Рошупкин, аспирант,****С.М. Братан, профессор, д-р техн. наук***Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053**root@sevgtu.sebastopol.ua***ИССЛЕДОВАНИЕ БОКОВЫХ СКОЛОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ АЛМАЗНОМ СВЕРЛЕНИИ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

*В статье представлены результаты исследований боковых сколов, возникающих при алмазном сверлении хрупких неметаллических материалов на примере оксидной керамики  $Al_2O_3$ . Разработаны трёхмерные конечно-элементные модели для различных схем закрепления заготовки с целью определения наиболее эффективной схемы закрепления, а также с целью использования их при расчётах высокопроизводительных граничных циклов управления операцией.*

**Ключевые слова:** *скол, алмазное сверление, циклы управления, конечно-элементная сетка.*

Изделия из хрупких неметаллических материалов (керамика, стекло, ситаллы, ферриты) всё чаще используются в промышленности. Причиной тому является постоянное повышение требований к качеству изделий. Основными особенностями неметаллических материалов являются высокая твердость, механическая прочность, низкий удельный вес, а также тепловая и коррозионная стойкость. Неметаллические материалы применяются в таких областях, как аэрокосмическая промышленность, машино- и приборостроение, радиоэлектроника [1 – 4].

Однако рост применяемости неметаллических материалов сдерживается из-за сложности их обработки, вызванных особенностями физико-механических свойств, таких как высокая твердость и склонность к хрупкому разрушению при местной, даже незначительной концентрации напряжений [1].

Формообразование отверстий в изделиях из данных материалов относится к числу самых трудоёмких операций.

Алмазное сверление является одним из наиболее эффективных методов обработки отверстий в деталях из хрупких неметаллических материалов. Среди основных путей повышения производительности процесса можно выделить использование станков с ЧПУ. Однако эффективная работа станков с ЧПУ возможна только на основе высокопроизводительных граничных циклов управления операцией. Для разработки таких циклов необходимо иметь достаточно большое количество информации о ходе протекания процесса с целью прогнозирования возможных параметров качества изделия.

Значительной проблемой при алмазном сверлении хрупких неметаллических материалов является образование боковых сколов [2]. Их наличие не только нарушает геометрическую точность детали, но и может приводить к её поломке во время работы. На рисунке 1 показаны боковые сколы. На рисунке 1(а) показана просверленная заготовка и керн, удалённый из заготовки. На рисунке 1(б) показан вид сбоку нижней части обработанного керна, на котором вокруг дна заметен боковой скол. В процессе алмазного сверления сквозных отверстий перед выходом сверла из зоны резания в результате процессов хрупкого разрушения керн откалывается от заготовки, что приводит к скалыванию кромки на выходе отверстия. Толщина бокового скола может быть замерена как на стержне (рисунок 1, б), так и на выходе отверстия (рисунок 1, в).

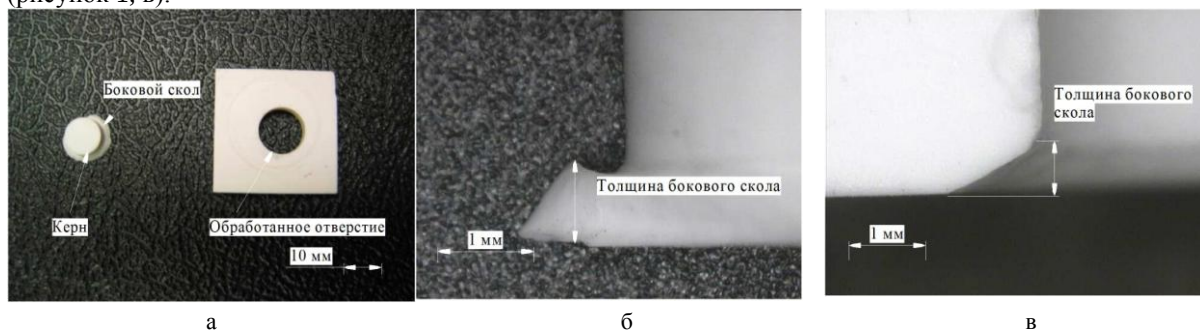


Рисунок 1 – Боковые сколы, возникающие при алмазном сверлении: а – две части обработанной заготовки; б – вид сбоку на керн; в – вид сбоку на отверстие

Исследованиями установлено, что величина боковых сколов при обработке хрупких материалов зависит от силы резания [1], микроструктуры материала и распространения напряжений [2], а также пропорциональна скорости удаления материала [3]. З. Ли и др. [4] проводили исследование сколообразования в процессе ротационной ультразвуковой механической обработки керамики методом

конечных элементов, а также экспериментально. В результате исследований было установлено, что уменьшение величины боковых сколов возможно за счёт увеличения длины опорной части приспособления. Кроме того, было установлено, что сила закрепления заготовки не оказывает значительного влияния на величину боковых сколов. В работе [4] приводятся различные схемы закрепления заготовок (на планках, на жёсткой плите с эластичной подложкой, со стеклянной подложкой), позволяющих уменьшить величину боковых сколов, однако, не предлагается никаких способов расчёта величины боковых сколов при той или иной схеме закрепления.

Проведенный литературный обзор показал, что проблема образования боковых сколов недостаточно исследована. Среди основных способов уменьшения боковых сколов можно выделить два направления: первое – уменьшение силы резания за счёт увеличения числа оборотов шпинделя и уменьшения величины подачи; второе – использование различных схем закрепления заготовки. Второе направление представляется наиболее эффективным, так как при этом не происходит потери производительности.

**Целью** данной работы является разработка конечно-элементных моделей алмазного сверления, позволяющих определять толщину боковых сколов при различных способах закрепления заготовки с целью определения наиболее эффективной схемы закрепления, а также использования их при расчётах высокопроизводительных граничных циклов управления операцией.

Моделирование выполнялось в программной среде ANSYS Workbench. При моделировании рассматривался только случай статического нагружения. Динамические явления не учитывались. В ходе моделирования определялись эквивалентные напряжения по фон Мизесу (von-Mises stress). Предполагалось, что образование бокового скола происходит в том случае, если эквивалентные напряжения по фон Мизесу достигают предела прочности материала при растяжении. Варьируемым фактором является глубина сверления  $t$ . Толщина скола определялась, как разница между толщиной детали и глубиной резания, при которой происходит образование скола.

Заготовка моделировалась в виде диска с размерами  $\varnothing 32 \times 5$  мм. Материал заготовки – оксидная керамика  $Al_2O_3$ . Свойства материала приведены в таблице 1 [4]. Наружный диаметр инструмента равен 12 мм, внутренний – 10 мм, радиус скругления режущей кромки – 0,1 мм.

Таблица 1 – Свойства материала заготовки

| Свойство                        | Единица измерения | Значение |
|---------------------------------|-------------------|----------|
| Модуль Юнга                     | МПа               | 190      |
| Коэффициент Пуассона            |                   | 0,25     |
| Плотность                       | г/см <sup>3</sup> | 3,5      |
| Предел прочности при растяжении | МПа               | 130      |
| Предел прочности при сжатии     | МПа               | 1750     |

На рисунке 2 представлена конечно-элементная сетка заготовки, состоящая из элементов тетраэдрической формы. С целью повышения точности расчётов было выполнено сгущение сетки в зоне образования боковых сколов.

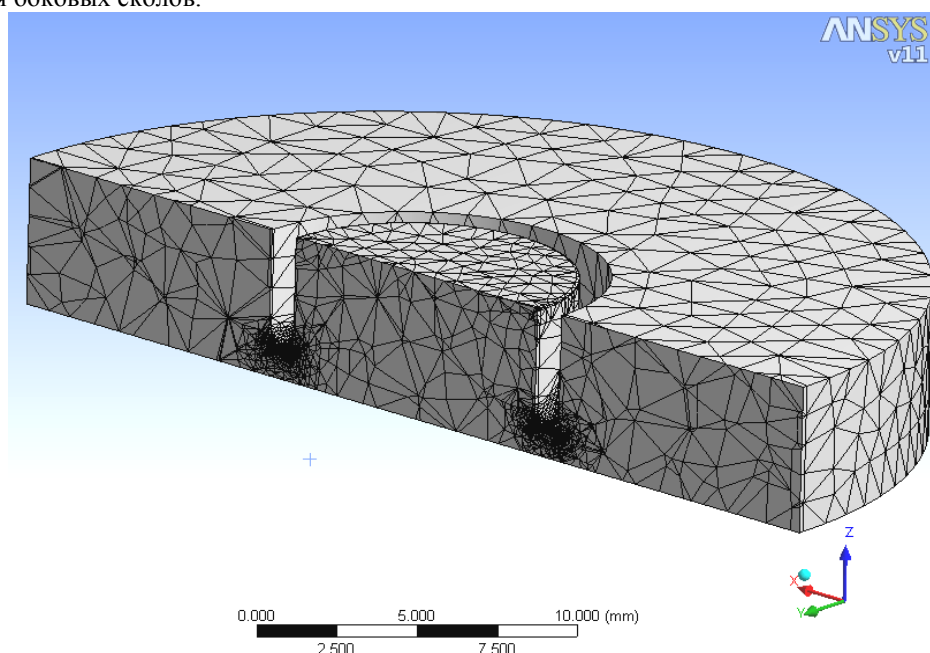


Рисунок 2 – Конечно-элементная сетка заготовки

В работе рассматривалось 3 схемы закрепления заготовки. 1 – на металлической плите с отверстием (рисунок 3, а); 2 – на металлической плите с резиновой подложкой (рисунок 3, б); 3 – на стеклянной подложке (рисунок 3, в). Для схем (а) и (б) рассматривалось по два случая нагружения: при диаметре отверстия в подложке равном 14 мм и 22 мм.

Граничные условия заданы жёстким закреплением подложки по её нижней плоскости. К торцу высверливаемой канавки прикладывалось давление, равное  $P = 15$  МПа (рисунок 2).

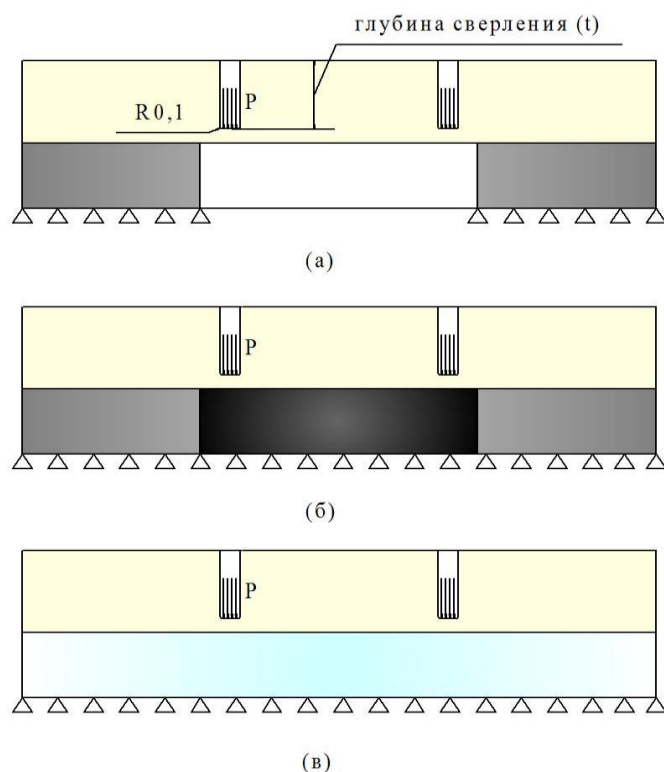


Рисунок 3 – Исследуемые схемы закрепления заготовок, граничные условия, приложенные усилия: (а) – на металлической плите с отверстием; (б) – на металлической плите с резиновой подложкой; (в) – на стеклянной подложке

На рисунке 4 представлено распространение эквивалентных напряжений в случае закрепления на металлической плите с диаметром отверстия 14 мм, глубина резания  $t = 4,15$  мм. Из рисунка видно, что наибольшие эквивалентные напряжения возникают в месте скругления с наружной стороны сверла и стремятся к нулю на торце сверла.

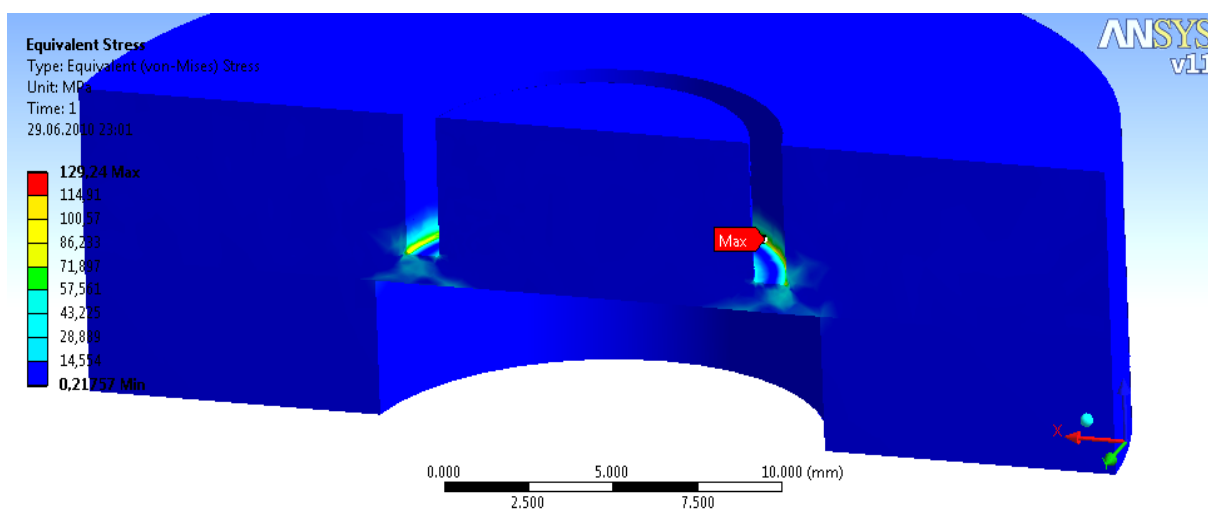


Рисунок 4 – Эпюры распространения эквивалентных напряжений

В таблице 2 представлены результаты расчёта толщины боковых сколов для различных схем закрепления.

Таблица 2 – Результаты расчёта

| Схема закрепления                                      | Толщина бокового скола, мм |
|--------------------------------------------------------|----------------------------|
| 1. На металлической плите с отверстием Ø14 мм          | 0,85                       |
| 2. На металлической плите с отверстием Ø22 мм          | 0,86                       |
| 3. На металлической плите с резиновой подложкой Ø14 мм | 0,089                      |
| 4. На металлической плите с резиновой подложкой Ø22 мм | 0,22                       |
| 5. На стеклянной подложке                              | Менее 0,01                 |

Из результатов расчётов можно сделать следующие выводы:

1. Боковые сколы могут быть уменьшены до допустимых значений или полностью устранены только за счёт изменения схемы закрепления заготовки без изменения режимов резания, а, следовательно, и без потери производительности.

2. При установке заготовки на металлической плите наблюдаются наибольшие боковые сколы. Уменьшение диаметра отверстия в плите приводит лишь к незначительному уменьшению их величины.

3. Значительное уменьшение боковых сколов возможно в случае закрепления заготовки на металлической плите с резиновой подложкой. Наиболее эффективным применение резиновой подложки становится при уменьшении диаметра отверстия в плите.

4. Полное устранение боковых сколов возможно только в случае использования схемы закрепления на стеклянной подложке.

Проведенные исследования позволили оценить величину боковых сколов при различных схемах закрепления, однако для практического использования разработанных моделей необходима экспериментальная проверка их адекватности, что является задачей дальнейших исследований.

#### **Бібліографічний список використаної літератури**

1. Study on edge chipping in rotary ultrasonic machining on ceramics: an integration of designed experiment and FEM analysis / Jiao Y [et al.] // Journal of Manufacturing Science and Engineering. — Vol. 127. — No. 4. — 2005. — P. 752–758.

2. Ng S. Control of machining induced edge chipping on glass ceramics / S. Ng, D. Le, S. Tucker, G. Zhang // Proceedings of the 1996 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Manufacturing Engineering Division, MED(4), Nov 17–22, 1996. — Atlanta, GA, USA, 1996. — P. 229–236.

3. Yoshifumi O. Chipping in high precision slot grinding of Mn-Zn ferrite / O. Yoshifumi, M. Tetsuo, S. Minoru // Annals of the CIRP. — Vol. 44. — No. 1. — 1995. — P. 273–277.

4. Edge-Chipping Reduction in RUM of Ceramics / Z.C. Li, W.C. Liang, Z.J. Pei, C. Treadwell // FEA and Experimental Verification, International Journal of Machine Tools & Manufacture — 2006. — N. 46. — P. 1469–1477.

*Поступила в редакцию 01.07.2010 г.*

#### **Рощупкін С.І., Братан С.М. Дослідження бічних сколів, що виникають при алмазному свердлінні крихких неметалічних матеріалів**

У статті представлені результати досліджень бічних відколків, що виникають при алмазному свердлінні крихких неметалічних матеріалів на прикладі оксидної кераміки  $Al_2O_3$ . Розроблені тривимірні кінцево-елементні моделі для різних схем закріплення заготовки з метою визначення найбільш ефективної схеми закріплення, а також з метою використання їх при розрахунках високопродуктивних граничних циклів управління операцією.

**Ключові слова:** відколок, алмазне свердління, цикли управління, кінцево-елементна сітка.

#### **Roshchupkin S.I., Bratan S.M. Research on the edge chippings in diamond drilling of brittle nonmetallic materials**

The paper presents a research on the edge chippings during diamond drilling of brittle nonmetallic materials using an example of alumina ceramic ( $Al_2O_3$ ). The 3D-FEA models of edge chippings for different modes of workpiece fixing are developed in order to define the most appropriate mode and also to use them in calculations of highly productive boundary cycles.

**Keywords:** chip, diamond drill, management cycles, certainly-element net.