

УДК. 621.923

С.И. РОЩУПКИН

(СевНТУ, г. Севастополь, Украина, tm@sevntu.com.ua)

### МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЕДИНИЧНОГО ЗЕРНА ПРИ АЛМАЗНОМ СВЕРЛЕНИИ ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ $Al_2O_3$ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Выполнено моделирование взаимодействия единичного зерна с оксидной керамикой  $Al_2O_3$  при алмазном сверлении с целью определения величины приращения съёма за счёт хрупкого разрушения, а также выявления закономерностей её изменения в зависимости от режимов резания.

#### Введение

В настоящее время сверление неметаллических материалов в основном ведется на универсальных и специальных сверлильных, а также фрезерных и токарных станках. Одним из путей повышения производительности процесса алмазного сверления является использование систем с программным управлением.

Преимуществом систем с программным управлением является их простота. Они выполняют свои функции по заранее заданному закону, без каких либо изменений режимных параметров в ходе протекания процесса. Эффективная работа таких систем возможна лишь в случае наличия математических моделей, адекватно описывающих поведение технологической системы с учётом сложной стохастической природы процесса, на основании которых разрабатываются высокопроизводительные граничные циклы управления операциями.

Управление процессом чаще всего осуществляется путём регулирования величины подачи инструмента по заранее заданному закону. В работе [1] было получено уравнение баланса перемещений (1), позволяющее определить величину подачи для любого момента времени

$$S_y = \frac{dt_f}{d\tau} + \frac{Q_{\Sigma}}{d\tau} + \frac{dH}{d\tau} + \frac{dA_y}{d\tau}, \quad (1)$$

где  $t_f$  – фактическая глубина микрорезания;  $Q_{\Sigma} = f(i_f)$  – интенсивность съёма материала;  $H$  – износ инструмента;  $A_y$  – деформации в технологической системе.

Удаление материала при алмазном сверлении в зоне контакта происходит за счёт комбинации процессов микрорезания – скальвания и хрупкого объемного разрушения.

Уравнение для определения величины съёма (2) было получено в работе [2]

$$\ln \frac{1}{1-\beta_0} - a_0 = \left\{ \left[ A_1 \left( \frac{\Gamma(\chi)(1-P_0)}{\Gamma(m+\chi+1)} + \frac{\Gamma(\chi+\beta)P_0}{\Gamma(m+\chi+\beta+1)t_f^\beta} \times \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \times (t_f - y - \Delta h)^\beta \right] + \left[ A_2 \left( \frac{\Gamma(\chi)}{\Gamma(m_x+\chi+1)} - \frac{\Gamma(\chi+\beta)}{\Gamma(m_x+\chi+\beta+1)t_f^\beta} \times (t_f - y - \Delta h_x)^\beta \right) \right] \right\} \quad (2)$$

$$A_1 = \frac{n_3 k_c C_b \chi V_c \Gamma(m+1)(t-t_0)}{H_u^\chi} (t_f - y)^{m+\chi}$$

$$A_2 = \frac{n_3 k_c C_b \chi V_c \Gamma(m_x+1) P_0 (t-t_0)}{H_u^\chi} (t_f - y - \Delta r_x)^{m+\chi}$$

где  $\beta_0$  – вероятность неудаления материала;  $a_0$  – показатель, определяющий исходную шероховатость поверхности;  $C_b$ ,  $m$  – коэффициенты формы зерна;  $P_0$  – значение вероятности скалывания являющееся характеристикой конкретного материала,  $y$  – расстояние от наружной поверхности заготовки до рассматриваемого уровня;  $\Delta h$  – величина съема;  $\Delta h_x$  – величина приращения съема за счет хрупкого разрушения;  $n_3$  – количество зерен в единице объема рабочего слоя инструмента;  $V_c$  – окружная скорость инструмента;  $H_u$  – величина слоя рабочей поверхности инструмента, в пределах которой подсчитывается  $n_3$ ;  $k_c$  – коэффициент стружкообразования;  $\beta$  – показатель степени зависящий от конкретных условий сверления.

Для решения данного уравнения необходимо знать величину приращения съема  $\Delta h_x$  за счет хрупкого разрушения. Одним из путей определения  $\Delta h_x$  является 3D-имитационное моделирование.

Целью данной работы является определение величины хрупкого разрушения  $\Delta h_x$ , а также выявление закономерностей её изменения в зависимости от режимов резания.

Моделирование процесса взаимодействия единичного зерна с обрабатываемым материалом выполнялось в программной среде LS-DYNA, основанной на методе конечных элементов.

При моделировании реальная форма зерна была заменена упрощённым геометрическим телом-эллипсоидом вращения с характерным размером 140 мкм, что соответствует зернистости алмазного порошка 160/125. Конечно-элементная (далее КЭ) сетка была сгенерирована в ANSYS ED 10 и состоит из 211 тетраэдрических элементов.

Заготовка моделировалась в виде плоской пластины размером 0,1x0,06x0,04 мм. КЭ сетка, состоящая из 144000 элементов прямоугольной формы с размером элемента 1,5x1x1 мкм была сгенерирована средствами LS-PREPOST.

Для описания свойств материала заготовки- $Al_2O_3$  была использована интегрированная в LS-DYNA модель Джонсона-Холмквиста (\*MAT\_JOHNSON\_HOLMQUIST\_CERAMICS) [3] для хрупких материалов, таких как стекло, керамика и др. Для эксперимента были использованы переменные модели, полученные в работе [3]. В качестве критерия разрушения в данной модели используется критерий накопленных пластических деформаций (3), т.е. в тех случаях, когда суммарная накопленная пластическая деформация равна допустимой, происходит полное разрушение материала.

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_f} \quad (3)$$

где  $\Delta \varepsilon_p$  – приращение пластической деформации;  $\varepsilon_f$  – предельно-допустимая



пластическая деформация (4).

$$\varepsilon_f = D_1 (P^* + T^*)^{D_2} \quad (4)$$

где  $D_1$  и  $D_2$  - постоянные коэффициенты;  $P^*$ ,  $T^*$  - давление и предел прочности при растяжении, нормализованные относительно предела упругости Гюгонио.

Алмазное зерно рассматривалось как абсолютно жёсткое тело (\*MAT\_RIGID) с модулем упругости 1140 ГПа.

Контактные условия были заданы моделью \*CONTACT\_ERODING\_NODES\_TO\_SURFACE с коэффициентом трения  $f=0,1$ .

Граничные условия заданы жёстким закреплением заготовки по её нижней плоскости. Зерно ограничено в перемещения и вращении в направлении всех осей кроме перемещения вдоль оси x и z (рис.1).

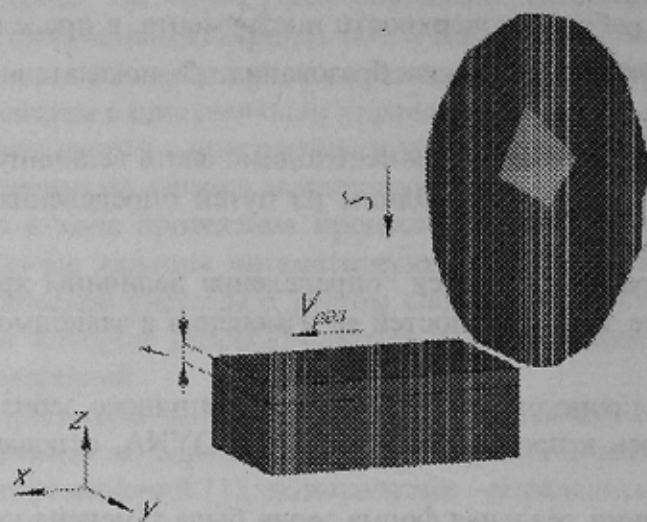


Рис. 1. Расчётная схема

В эксперименте было исследовано влияние двух факторов на механизмы съёма материала: скорость резания и глубина внедрения зерна. Для каждого фактора было выбрано три уровня варьирования. План эксперимента представлен в таблице 1.

Таблица 1. План эксперимента

№ опыта	Режимы резания	
	V, м/с	t, мм
1	1,5	0,007
2	1,5	0,01
3	1,5	0,015
4	4,5	0,007
5	4,5	0,01
6	4,5	0,015
7	7	0,007
8	7	0,01
9	7	0,015

На рисунку 2 представлені результати розрахунок, якими являються зони руйнувань, для глибини виведення зерна 0,01 мм для швидкостей різання 1,5; 4,5; 7 м/с (зверху вниз). Аналогічні результати були отримані і для інших режимів.

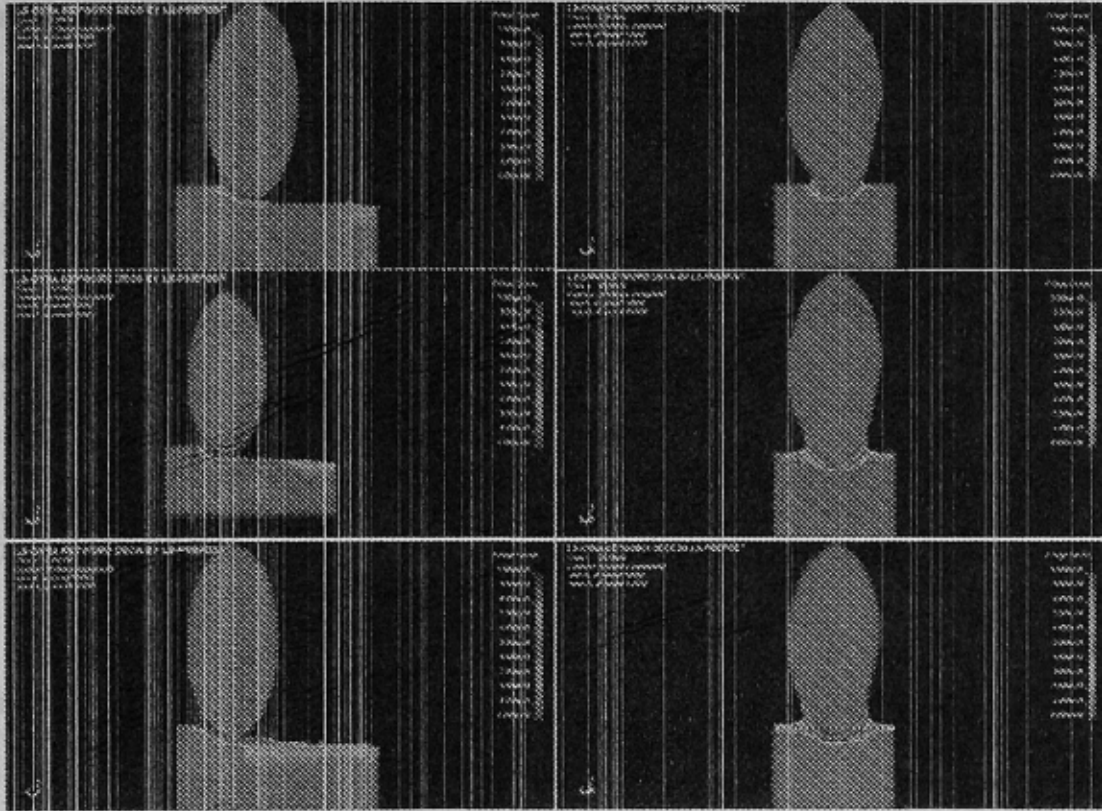


Рис. 2. Зони руйнувань

На рисунку 3 представлені результати розрахунок величини хрупкого руйнування  $\Delta h_x$  для всіх 9 спроб.

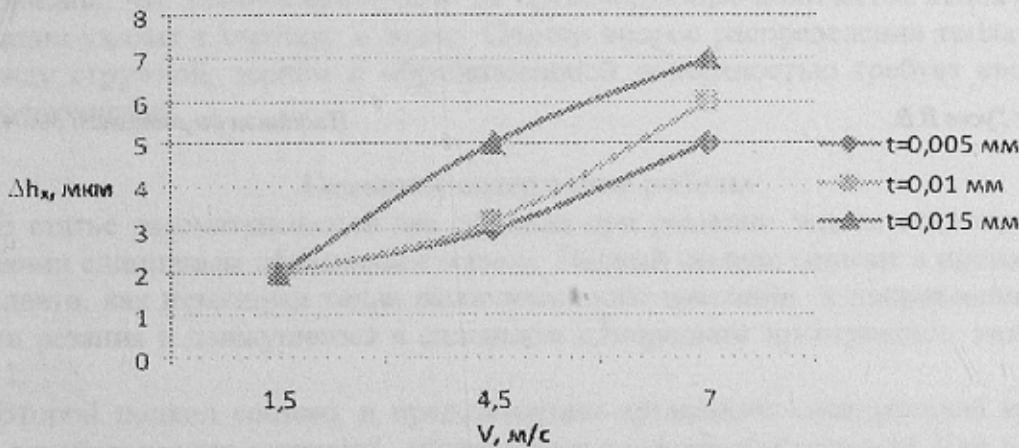


Рис. 3. Результати розрахунок величини хрупкого руйнування  $\Delta h_x$



Из анализа результатов расчёта можно сделать следующие выводы:

- Поверхности съёма материала при алмазном сверлении могут формироваться ниже линии движения алмазного зерна.
- С увеличением скорости резания происходит увеличение фактической глубины микрорезания за счёт хрупкого разрушения.
- Увеличение скорости резания приводит к возникновению боковых трещин, которые после снятия нагрузки выходят на поверхность, скалывая значительные объёмы материала.
- Увеличение глубины внедрения зерна приводит к увеличению фактического съёма материала за счёт хрупкого разрушения, однако при скорости резания до 4,5 м/с и глубине внедрения до 0,01 мм это увеличение незначительно.
- Используемый метод позволяет определить величину приращения съёма за счёт хрупкого разрушения, которая может быть использована для расчёта съёма материала по зависимостям, учитывающим стохастическую природу процесса алмазного сверления.

Однако при моделировании операции не учитывались тепловые процессы, возникающие в зоне резания и оказывающие влияние на процесс удаления материала. В перспективе планируется исследование влияния температурного фактора на процесс удаления материала, что является задачей дальнейших исследований.

#### Список литературы:

1. Братан С.М. Взаимосвязь перемещений в технологической системе при алмазном сверлении неметаллических материалов / С.М. Братан, С.И. Роцупкин // Вісник Сумського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. – 2008 – Вип. №1 – С 49 – 53
2. Братан С.М. Моделирование формообразования отверстий при алмазном сверлении неметаллических материалов / С.М. Братан, С.И. Роцупкин // Високі технології в машинобудуванні. Зб. наук. пр. – 2008 – Вип.2(17) – С 54 – 59.
3. ANDERSON, C.E., JOHNSON, G.R., HOLMQUIST, T.J, (1995) "Ballistic experiments and computations of confined 99,5 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic tiles", Proceedings of Fifteenth International Symposium on Ballistics, Jerusalem, Israel, May 1995
4. LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL : Version 971.-Livemore: LSTS, 2007.-2206 с.

Рецензент: Гусев В.В.

Надійшла до редколегії 30.04.19