

С. И. Рощупкин, С. М. Братан, д-р техн. наук, Севастополь, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА ПРИ АЛМАЗНОМ СВЕРЛЕНИИ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

У статті представлені результати розробки аналітичних залежностей, що дозволяють розраховувати знос інструменту при алмазному сверлінні крихких неметалічних матеріалів. Залежності були отримані на основі теоретико-ймовірнісного аналізу роботи одиничного зерна в алмазному сверлі.

В статье представлены результаты разработки аналитических зависимостей, которые позволяют рассчитывать износ инструмента при алмазном сверлении хрупких неметаллических материалов. Зависимости были получены на основе теоретико-вероятностного анализа работы единичного зерна в алмазном сверле.

*S. I. ROSCHUPKIN, S. M. BRATAN
MODELLING OF DETERIORATION OF THE TOOL AT DIAMOND DRILLING FRAGILE
NONMETALLIC MATERIALS*

This paper presents results of the development of analytical relationships which make it possible to calculate tool wear in diamond drilling of brittle nonmetallic materials. Relationships were based on probabilistic analysis of single grain working in diamond drill.

Алмазное сверление кольцевыми сверлами является наиболее эффективным методом обработки отверстий в деталях из хрупких неметаллических материалов.

С целью повышения производительности процесса и улучшения качества получаемых отверстий необходимо осуществление его на высокопроизводительном оборудовании с ЧПУ. До настоящего времени эта задача осложнялась отсутствием математических моделей, адекватно описывающих процесс алмазного сверления. Управление процессом чаще всего осуществляется путем 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; $Q_\Sigma = f(t_f)$ – интенсивность съема материала; H – износ инструмента; A_y – деформации в технологической системе. Уравнения по расчету съема материала было получено в работе [2]. Неизвестной величиной в данном уравнении является величина износа инструмента.

Целью работы является разработка аналитических зависимостей, позволяющих рассчитывать износ инструмента при алмазном сверлении хрупких неметаллических материалов.

Моделирование износа абразивного инструмента возможно на основе теоретико-вероятностного анализа работы единичного зерна в алмазном сверле и дальнейшего перехода к работе инструмента в целом.

Рассмотрим особенности работы абразивного зерна, вершина которого расположена на расстоянии u от условной наружной поверхности инструмента (см. рисунок 1). Если $u=0$, то вершина расположена на условной наружной поверхности. Если $u > t_f$, то при вращении сверла вершина проходит за пределами зоны контакта, зерно выполняет вспомогательную функцию, образуя внутреннюю конструкцию сверла. При износе инструмента расстояние от наружной поверхности до вершины зерна уменьшается. Если $u < t_f$, то зерно проходит зону контакта и может срезать обрабатываемый материал.

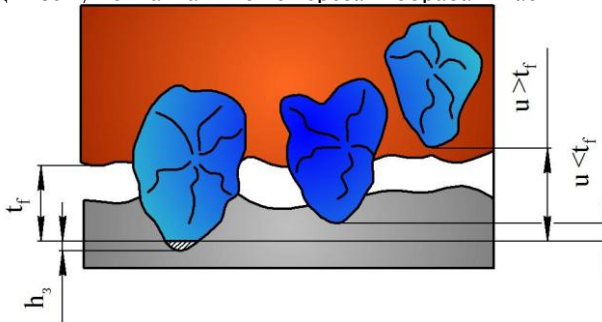


Рисунок 1 – Схема зоны контакта алмазного сверла с заготовкой

За один оборот инструмента вершина зерна изнашивается на величину Δh_3 , линейный размер сверла уменьшается на величину размерного износа ΔH . В процессе сверления расстояние между вершиной зерна и условной наружной поверхностью инструмента будет непрерывно уменьшаться. Такая закономерность будет наблюдаться до тех пор, пока вершина зерна не совместится с условной наружной поверхностью инструмента. Не каждая из вершин выходит на условную наружную поверхность, часть из них разрушается, часть зерен вырывается из связки круга. Если бы вершина зерна не изнашивалась, то глубина микрорезания при одном обороте увеличивалась бы на величину размерного износа сверла.

Изменение глубины резания единичным алмазным зерном, проходящим через зону контакта, определяется зависимостью

$$t_{zi} = t_{zi-1} + \Delta H_{i-1} - \Delta h_{zi-1}, \quad (1)$$

где t_{zi} и t_{zi-1} – глубина резания алмазным зерном в основной плоскости при выполнении i -го и $i-1$ -го оборотов сверла; ΔH_{i-1} и Δh_{zi-1} – соответственно размерный износ инструмента и вершины зерна при $i-1$ -ом обороте круга.

Износ зерна на этапе установившегося процесса пропорционален относительному износу h_0 и пути резания L_p .

$$\Delta h_{zi-1} = h_0 L_{pi-1}. \quad (2)$$

Величина относительного износа зависит от материала обрабатываемой заготовки, материала абразивного зерна и температуры на площадке контакта

зерна с материалом заготовки. Для вычисления относительного износа в работе [3] предложена зависимость

$$h_0 = K \frac{\sigma_N}{H_a}, \quad (3)$$

где σ_N – нормальное давление на поверхности контакта; K – коэффициент, определяемый материалами трущихся тел; H_a – твердость (микротвердость) материала при температуре трения.

$$H_a = Ae^{-\alpha\Theta}, \quad (4)$$

где Θ – температура на площадке контакта абразивного зерна с материалом заготовки; K, α – эмпирические коэффициенты.

Температуру на площадке контакта абразивного зерна с материалом заготовки определим по зависимости, предложенной Балыковым [4].

$$\Theta(z, t) = \frac{aP_o Vt}{\sqrt{\pi F \Delta t \lambda}} 2\sqrt{at} \quad (5)$$

где a – температуропроводность обрабатываемого материала; P_o – осевая сила резания; V – скорость резания; t – время единичного контакта алмазного зерна приблизительно равно:

$$t = d / V$$

где d – диаметр зерна; Δt – время генерирования тепла; F – площадь контакта алмазного зерна приблизительно равна:

$$F = \frac{\pi d^2}{4};$$

λ – теплопроводность алмаза.

Подставим (4) и (5) в (3). Тогда формула для определения относительного износа примет вид:

$$h_0 = K \frac{\sigma_N}{Ae^{-\alpha \frac{aP_o Vt}{\sqrt{\pi F \Delta t \lambda}} 2\sqrt{at}}} \quad (6)$$

Длина резания абразивным зерном при одном обороте круга вследствие наличия на поверхности риск, сформированных при предшествующей обработке и риск от ранее прошедших зерен, не равна длине дуги, по которой вершина зерна перемещается в зоне контакта инструмента с заготовкой. В каждой точке зоны вероятность контакта равна вероятности неудаления материала. В связи с этим длина пути резания при одном обороте круга определится

$$L_p = \int_{t_0}^t P(\bar{M}) d\tau, \quad (7)$$

Зависимость для расчета вероятности неудаления материала в уравнении (7) определяется по зависимости (8) при подстановке вместо y текущего значения расстояния $t_s(\tau)$ от верхней границы слоя шероховатости поверхности до вершины зерна при ее прохождении зоны контакта.

$$\begin{aligned}
1 - \beta_0 = \exp \left\{ -a_0 \left[A_1 \left(\frac{\Gamma(\chi)(1-P_0)}{\Gamma(m+\chi+1)} + \frac{\Gamma(\chi+\beta)P_0}{\Gamma(m+\chi+\beta+1)t_f^\beta} \times \right. \right. \right. \\
\left. \left. \left. \times (t_f - y - \Delta h)^\beta \right) \right] + \left[A_2 \left(\frac{\Gamma(\chi)}{\Gamma(m_x+\chi+1)} - \frac{\Gamma(\chi+\beta)}{\Gamma(m_x+\chi+\beta+1)t_f^\beta} \times \right. \right. \\
\left. \left. \left. \times (t_f - y - \Delta h_x)^\beta \right) \right] \right\} \\
A_1 = \frac{n_3 k_c C_b \chi V_c \Gamma(m+1)(t-t_0)}{H_u^\chi} (t_f - y)^{m+\chi} \\
A_2 = \frac{n_3 k_c C_b \chi V_c \Gamma(m_x+1)P_0(t-t_0)}{H_u^\chi} (t_f - y - \Delta r_x)^{m+\chi}
\end{aligned} \tag{8}$$

где 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; Δh – величина съема; Δh_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; β – показатель степени зависящий от конкретных условий сверления.

Для установившегося процесса сверления, когда размерный износ сверла постоянен и абразивное зерно работает без сколов, уравнение (1) может быть записано в виде (при $t_u = 0$):

$$t_3(\tau) = \Delta H v_c \tau - h_3(\tau), \tag{9}$$

где $h_3(\tau)$ – износ вершины зерна в момент времени τ ; v_c – частота вращения сверла.

Приращение износа вершины зерна вычислим из предположения, что за $v_c \Delta \tau$ оборотов сверла длина пути резания единичным зерном за один оборот изменяется незначительно

$$\Delta h_3 = v_c \Delta \tau \int_{t_0}^t h_0 P(\bar{M}) d\tau. \tag{10}$$

Переходя к пределу $\Delta \tau \rightarrow 0$ и, заменяя $\frac{\Delta h_3}{\Delta \tau}$ на $\frac{dh_3}{d\tau}$, получим интегро-дифференциальное уравнение износа абразивного инструмента

$$\frac{dh_3}{d\tau} = v_c \int_{t_0}^t h_0 P(\bar{M}) d\tau. \tag{11}$$

Для момента времени $t = t_0 = 0$ износ вершины зерна $h_3 = 0$, что является для дифференциального уравнения (11) начальным условием.

При работе инструмента в режиме затупления (без разрушения зерен и вырывания их из связки круга) размерный износ вершины зерна на условной наружной поверхности инструмента равен радиальному износу круга

$$\Delta h_{3i} = \Delta H_i \quad \text{при} \quad t_{3i} = t_f. \quad (12)$$

При работе инструмента в режиме самозатачивания наиболее прочно закрепленные абразивные зерна разрушаются или вырываются из связки при фактической (максимальной) глубине резания

$$R_{3\max} = P_{3\max} \quad \text{при} \quad t_3 = t_f, \quad (12)$$

где $R_{3\max}$ и $P_{3\max}$ – наибольшая прочность закрепления абразивного зерна в связке инструмента и наибольшая сила, действующая на зерно при выходе его вершины на условную наружную поверхности инструмента.

Полученные зависимости учитывают текущее состояние зерен сверла, от оборота к обороту в функции от геометрических факторов и режимов обработки и могут быть использованы при разработке граничных циклов управления операцией алмазного сверления. Однако для более полного описания поведения технологической системы нужно учитывать не только нестационарность и стохастическую природу процесса, но и его динамическую характеристику, что представляет собой дальнейшие перспективы развития в данной области.

Список использованных источников: 1. Братан С.М., Роуцупкин С.И. Взаимосвязь перемещений в технологической системе при алмазном сверлении неметаллических материалов. Вісник Сумського державного технічного університету. Науковий журнал Серія «Технічні науки». Видавництво СумДТУ. вып. №1-2008-С 49-53. 2. Братан С.М., Роуцупкин С.И. Моделирование формообразования отверстий при алмазном сверлении неметаллических материалов. Висока технологія в машинобудуванні. Зб. наук.пр. ХНТУ: Харків, -2008-Вип.2(17)-С54-59. 3. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования. Анализ и моделирование пространственно-временного взаимодействия инструмента и обрабатываемой поверхности чистовых и отделочных операций: Дис...д-ра. техн. наук:05.03.01 – Барнаул, 1979. – 402 с. 4. Бальков А. В. Повышение эффективности обработки отверстий в деталях из хрупких неметаллических материалов на основе алмазного сверления.- Дис... на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.08 – Технология машиностроения, – Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, 2004.

Поступила в редколлегию 16.04.2011

Bibliography (transliterated): 1. Bratan S.M., Rowupkin S.I. Vzaimosvjaz' peremewenij v tehnologicheskij sisteme pri almaznom sverlenii nemetallicheskih materialov. Visnik Sums'kogo derzhavnogo tehničnogo universitetu. Naukovij zhurnal Serija «Tehnični nauki». Vidavnitstvo SumDTU. vyp. №1-2008-S 49-53. 2. Bratan S.M., Rowupkin S.I. Modelirovanie formoobrazovanija otverstij pri almaznom sverlenii nemetallicheskih materialov. Visoki tenologij v mashinobuduvanni. Zb. nauk.pr. HNTU: Harkiv, -2008-Vip.2(17)-S54-59. 3. Novoselov Ju.K. Dinamika formoobrazovanija. Analiz i modelirovanie prostranstvenno-vremennogo vzaimodejstvija instrumenta i obrabatyvaemoj operacii chistovyh i otdelochnyh operacij: Dis...d-ra. tehn. nauk:05.03.01 – Barnaul, 1979. – 402 s. 4. Balykov A. V. Povyshenie jeffektivnosti obrabotki otverstij v detaljah iz hrupkih nemetallicheskih materialov na osnove almaznogo sverlenija.- Dis. na soiskanie uchenoj stepeni doktora tehničeskij nauk po special'nosti 05.02.08 – Tehnologija mashinostroenija, – Moskovskij gosudarstvennyj tehnologičeskij universitet «STANKIN», Moskva, 2004.