

УДК 621.923

Р.М. Стрельчук, канд. техн. наук, Д.С. Стороженко,
М.Д. Узунян, д-р техн. наук, Харьков, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОЦЕССА МИКРОРЕЗАНИЯ НАНОСТРУКТУРНЫХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Представлено результати досліджень умовних напруг різання і коефіцієнтів мікрорезання після обробки. Встановлено умови взаємодії алмазних зерен з твердими сплавами.

Представлены результаты исследований условных напряжений резания и коэффициентов микрорезания после обработки. Установлены условия взаимодействия алмазных зерен с твердыми сплавами.

The results of studies of conditional cutting and stress factors microcutting after treatment. The conditions for the interaction of diamond grains with hard alloys.

ВВЕДЕНИЕ

Работоспособность алмазных шлифовальных кругов во многом определяется условиями и особенностями взаимодействия зерен с обрабатываемым материалом. Для получения достоверной информации наиболее удобно методически изучать это взаимодействие при микрорезании, т.е. резании единичными алмазными зёрнами. Закономерности микрорезания, как правило, присущи процессу шлифования – массового резания – царапания, особенно при работе в режиме самозатачивания в условиях алмазно-искрового шлифования, когда контакт связки с обрабатываемым материалом весьма незначителен.

Исследованию механизма процесса резания, физико-механических свойств, количественной оценке режущей способности абразивных материалов на основе изучения резания единичным зёрном посвящены фундаментальные работы, заложившие основы алмазно-абразивного шлифования и выполненные Давиденковым Н.Н., Кузнецовым В.Д., Полосаткиным Г.Д., Масловым Е.Н., Богомолвым Н.И, Сагардой А.А. и др. Анализ исследований по микрорезанию достаточно полно изложен в работах [1-4].

Однако особенности резания единичными алмазными зёрнами твердых сплавов, в том числе наноразмерного монокарбида вольфрама практически не изучены по понятным причинам.

Оценка обрабатываемости различных твердых сплавов, характера поломок и работоспособности алмазных зерен, износа и условных

напряжений резания – вопросы, которые непосредственно связаны с возможностями прогнозирования высокопроизводительной обработки твердых сплавов, требуют дальнейшего исследования и представляют интерес.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Микрорезание твердых сплавов осуществлялось единичными алмазными зёрнами марки АСБ 1000, которые с помощью эпоксидного клея приклеивались к инденторам. Условия взаимодействия зёрен с обрабатываемым материалом определялись конкретной целью эксперимента. Применялось микрорезание с малой скоростью продольного перемещения зёрна, так называемое «медленное» резание-царапание, подобно исследованиям по изнашиванию и трению при склерометрии.

При этом применялись различные критерии, характеризующие особенности процесса микрорезания.

По условным напряжениям обычно оценивают напряженность процесса микрорезания, характер деформации в контакте. Они определяются как отношение тангенциальной составляющей силы резания к сечению среза [5]:

$$\sigma_y = P_z / f_z \quad (1)$$

Широко используемым при микрорезании критерием является отношение тангенциальной силы к радиальной, называемое коэффициентом шлифования [6]:

$$K_{ш} = P_z / P_y \cdot \quad (2)$$

Некоторые авторы считают его наиболее стабильным силовым показателем процесса микрорезания [56].

Коэффициент шлифования в отдельных случаях называют по аналогии с коэффициентом трения коэффициентом абразивного резания. Вместе с тем, коэффициентом абразивного резания Богомолов Н.И., впервые его применивший, называет обратное отношение указанных сил, т. е.:

$$K_p = P_y / P_z \cdot \quad (3)$$

Нам представляется более приемлемым отношение P_z / P_y называть коэффициентом микрорезания, в дальнейшем обозначаемом K_M , а отношение P_z / f_z – условным напряжением микрорезания σ_M .

Работоспособность алмазных зёрен оценивалась отношением объема снятого материала (V_M) к объему изношенной части зёрна (V_3):

$$R = \frac{V_M}{V_3} \cdot \quad (4)$$

Некоторые исследователи определяют отношение объема снятого материала к объему изношенной части алмаза, как коэффициент шлифуемости [7]. Применение этого термина следует признать неудачным, так как процесс резания – царапания существенно отличается от процесса шлифования.

Объем снятого материала подсчитывался с помощью профилограмм поперечных сечений рисок – царапин, в начале (S_1) и конце (S_2) пути микрорезания по формуле:

$$V_M = \frac{S_1 + S_2}{2} L, \quad (5)$$

где L - длина риски-царапины.

Площадь поперечного сечения среза может быть определена и расчетным путем по известной глубине микрорезания и принятой форме режущей кромки. Если принять, исходя из некоторых литературных данных, что форма режущей кромки – конус, то формула для расчета площади среза (сечения канавки) в зависимости от глубины внедрения имеет вид:

$$S(z) = z^2 \operatorname{tg} \alpha, \quad (6)$$

где α – половина угла при вершине конуса. А при форме внедрившейся кромки в виде конуса с радиусом округления при вершине r_0 сечения среза определится по формулам [8]:

для $z > (r_0 - r_0 \sin \alpha)$

$$S(z) = \left(\frac{r_0 \cos \alpha}{\operatorname{tg} \alpha} + z - r_0 + r_0 \sin \alpha \right)^2 \operatorname{tg} \alpha - \frac{r_0^2 \cos \alpha}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{\pi r_0^2 (180 - 2\alpha)}{360} - r_0^2 \frac{\sin 2\alpha}{2}; \quad (7)$$

для $z < (r_0 - r_0 \sin \alpha)$

$$S(z) = \frac{\pi r_0^2 2 \arccos \left(1 - \frac{z}{r_0} \right)}{360} - (r_0 - z)^2 \operatorname{tg} \left(\arccos \left(1 - \frac{z}{r_0} \right) \right). \quad (8)$$

Объем изношенной части зерна, принятой в виде конуса, можно принять равным $\cong 1,1 S r_k$, где r_k – радиус основания конуса, определяемый по записанной профилограмме поперечного сечения рисски-царапины S , которую

можно рассмотреть как сечение конуса плоскостью, проходящей через его вершину перпендикулярно основанию. Площадь сечения $S = r_{\kappa} z$ (z – высота) рассчитывалась по профилограммам в начале (S_1) и конце (S_2) каждого эксперимента, после чего определялся объем изношенной части зерна $V_3 = S_1 r_{\kappa_1} - S_2 r_{\kappa_2}$. Таким образом,

$$R = \frac{V_M}{V_3} = \frac{(S_1 + S_2)L}{2,2(S_1 r_{\kappa_1} - S_2 r_{\kappa_2})}. \quad (9)$$

Эксперименты проводились на специальной установке по микрорезанию, схема которой показана на рис. 1. Образец (4) из твердого сплава устанавливается на каретку (6), которая приводится в движение посредством нити с помощью редукторного электродвигателя СД-54 ($n = 8,7$ об/мин) (7), обеспечивающего продольную скорость перемещения 0,5 м/мин. В исходное положение каретка перемещается с помощью пружины (5). Опыты выполнялись по схеме упругого резания-царапания, при котором нормальная нагрузка (P_y) на алмазное зерно задается с помощью грузов (1), а тангенциальная составляющая усилия резания (P_z) измеряется с помощью специального динамометра (2), в резьбовом отверстии упругого элемента которого закреплен индентор с алмазным зерном (3).

Динамометр закреплен на левом плече коромысла (8), шарнирно (на двух подшипниках) установленного в обойме стойки. На правом плече коромысла размещен противовес (9), который может перемещаться по коромыслу для уравнивания его перед установкой набора грузов, обеспечивающих необходимое усилие P_y . Для измерения усилий применялся специально разработанный тензорезисторный динамометр, конструкция которого обеспечивает разгрузку упругого элемента от нормальной составляющей усилия резания P_y , воспринимаемой подвижной осью.

Таким образом, часть упругого элемента, на которой размещены тензодатчики деформации, сжатию не подвергается, а испытывает лишь деформацию изгиба от воздействия составляющей P_z , что исключает взаимовлияние сил микрорезания. Преобразование и регистрация деформаций упругого элемента, воспринимаемых тензорезисторами ПКП 10-100, осуществляется при помощи тензоусилителя модели ТА-5 с регистрирующими приборами; в дальнейшем возможно использование осциллографов при необходимости.

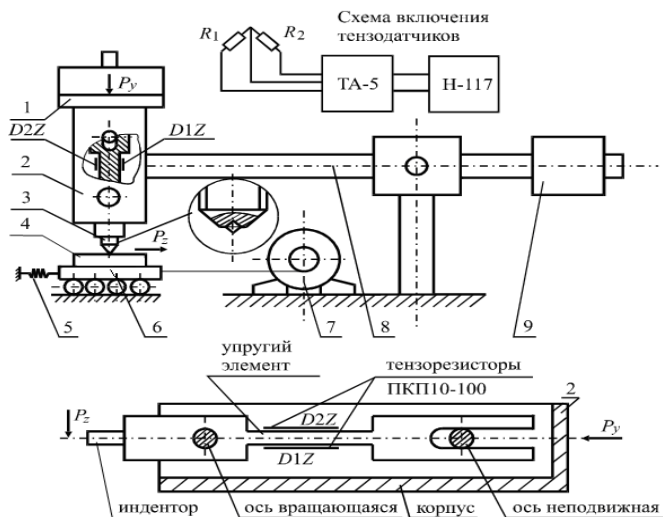


Рисунок 1 – Схема установки для микрорезания при небольших скоростях

Эксперименты проводились при нагрузках 0,8 Н; 1,0 Н; 1,2 Н; 1,4 Н. Были использованы алмазные зерна АСБ 1000. Перед проведением эксперимента все пластины были отшлифованы, а затем доводились с помощью алмазной пасты.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Развитость режущей поверхности зерен оказывает существенное влияние на их поведение в процессе шлифования. Поэтому много работ посвящено линейно-геометрическим измерениям параметров зерен в проходящем свете обычных оптических микроскопов, по микрофотографиям, либо с помощью зарисовок на рисовальных устройствах с последующей оценкой размеров, углов заострения вершин и радиусов округления кромок [9]. Подобная оценка зерен может характеризовать лишь их исходную, возможную режущую способность, либо по выражению Кашеева М.И. «мгновенную абразивную способность». Однако наибольший интерес и практическую ценность представляет изучение и оценка режущих свойств работающих зерен в условиях взаимодействиях их с материалами, имеющими различные физико-механические свойства.

Представляет интерес анализ условных напряжений резания и коэффициентов микрорезания, особенно в диапазоне малых толщин среза,

что позволит установить условия взаимодействия алмазных зерен с твердыми сплавами.

В табл.1 приведены результаты экспериментов с постоянной задаваемой нормальной силой, выполненные на установке для «медленного» микрорезания (см. рис.1). Основными измеряемыми выходными параметрами являются тангенциальная сила P_z и толщина среза z ; производными значениями, получаемыми пересчетом – коэффициент микрорезания K_m и условное напряжение резания σ_m .

Для приведенных марок твердых сплавов увеличение нормальной нагрузки на зерна приводит к соответствующему росту и тангенциальной составляющей. При этом для сплава ВК6 наблюдается более интенсивный рост силы P_z . Толщины среза для одних и тех же значений силы P_y также отличаются – меньшие их значения характерны для наноразмерного твердого сплава «ВолКар», что свидетельствует о худшей внедряемости алмазных зерен. Большая глубина внедрения зерен у сплава ВК6 при остальных одинаковых условиях приводит к увеличению сопротивления сдвига, что способствует возникновению больших тангенциальных усилий микрорезания P_z .

Таблица 1 – Значения P_z и z для различных нормальных нагрузок P_y

Материал	$P_y \cdot 10^2$, Н	80,0	100,0	120,0	140,0
ВК6	$P_z \cdot 10^2$, Н	19,2	31,7	45,8	62,7
	z , мкм	1,9	2,5	3,1	3,7
WK	$P_z \cdot 10^2$, Н	17,2	28,4	40,7	53,3
	z , мкм	1,6	2,1	2,6	3,0

Следует заметить, что рост силы P_z несколько опережает увеличение нормальной силы, что объясняет соответствующее изменение коэффициента микрорезания – увеличение силы P_y приводит к повышению K_m (рис. 2).

Различные значения K_m , получаемые при микрорезании испытываемых твердых сплавов с постоянной нормальной нагрузкой характеризуют их обрабатываемость. Следовательно, обрабатываемость сплава ВК6 лучше, чем «ВолКар».

Анализ условных напряжений микрорезания в этих же условиях позволяет оценить сравнительную напряженность процесса резания-

царапания различных материалов и также дать представление об обрабатываемости (рис. 3).

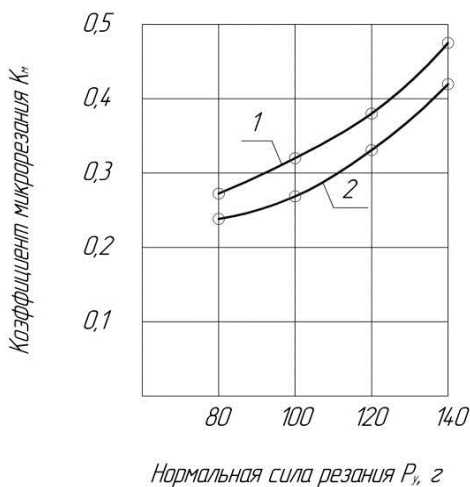


Рисунок 2– Влияние нормальной силы на коэффициент микрорезания:
1 – ВК6; 2 – «ВолКар»

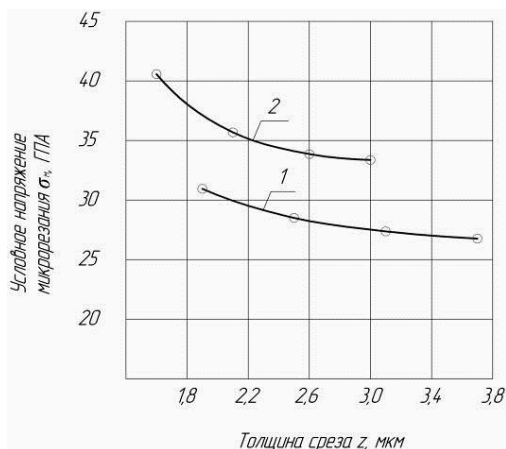


Рисунок 3 – Влияние толщины среза на условное напряжение микрорезания: 1 – ВК6; 2 – «ВолКар»

Увеличение толщины среза, связанное с увеличением нормальной нагрузки, приводит к снижению условных напряжений для всех марок сплавов. При этом более интенсивное снижение σ_m имеет место в диапазоне меньших толщин среза. Следует отметить, что перегиба кривых σ_m не обнаруживается, что свидетельствует о превалировании процесса резания над пластическим выдавливанием или упруго-пластическим оттеснением во всем диапазоне толщин среза.

Сравнение различных кривых позволяет установить, что большие значения σ_m возникают при обработке наноструктурного сплава «ВолКар», меньшие – ВК6.

Таким образом, на основании полученных данных по K_m и σ_m можно установить, что в порядке ухудшения обрабатываемости, исследуемые сплавы располагаются в такой последовательности: ВК6, «ВолКар».

Следует заметить также, что с увеличением толщины среза нормальная и тангенциальная составляющие сил микрорезания возрастают, что объясняется ростом элементарных сил сдвига и трения (рис. 4, 5). Микрорезание наноструктурных твердых сплавов сопровождается большими значениями усилий P_z и P_y ; при этом различие в величинах P_y больше чем P_z , и с ростом z оно увеличивается.

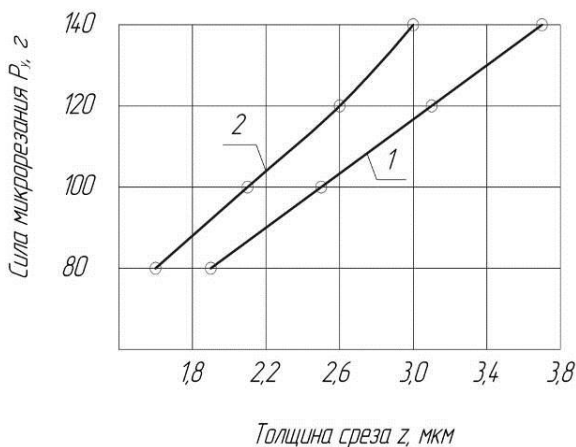


Рисунок 4 – Влияние толщины среза на нормальную составляющую усилия микрорезания: 1 – ВК6; 2 – «ВолКар»

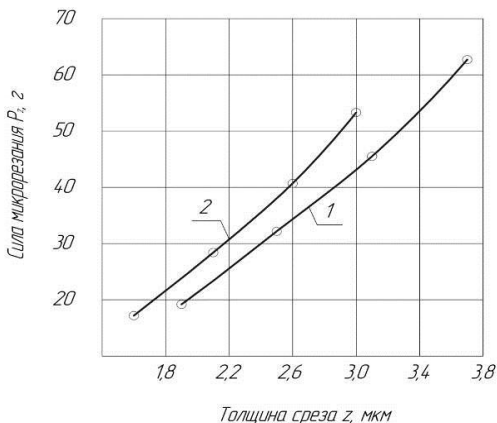


Рисунок 5 – Влияние толщины среза на тангенциальную составляющую усилия микрорезания: 1 – ВК6; 2 – «ВолКар»

При такой разнице в способности сопротивляться внедрению при микрорезании (царапании) для достижения одинаковой толщины среза к алмазному зерну необходимо приложить большую величину нормальной силы при взаимодействии его со сплавом «ВолКар».

Проведенные исследования «медленного» резания-царапания единичными зёрнами имеют и самостоятельное значение – в дальнейшем позволяют моделировать процессы взаимодействия алмазных зёрен с обрабатываемыми материалами при сравнительной оценке изнашиваемости различных материалов и абразивных зёрен.

Список литературы: 1. Полосаткин Г.Д., Соломеин И.А. Изнашивание при микрорезании // Изв. вузов. Физика. – 1955. – № 2. – С. 117–128. 2. Сагарда А.А., Химач О.В. Силы резания и температура в зоне контакта алмазного зерна с металлом // Вест. машиностроения. – 1973. – № 6. – С. 70–72. 3. Маслов Е.Н. Теоретические основы процесса царапания металлов // Склерометрия. – М., 1968. – С. 24–44. 4. Полосаткин Г.Д., Соломеин И.А. Исследование механизма образования микроцарапины на металлах в диапазоне скоростей от 0,02 до 120 м/с // Склерометрия. – М.: Наука, 1968. – С. 65–71. 5. Богомолов Н.И. Исследование сил трения при микрорезании металлов // Трение, смазка и износ деталей машин. – 1964. – №5. – С. 47–52. 6. Бабчиницер М.И. Усилие при шлифовании металлов // Станки и инструмент. – 1947. – №6. – С. 14–17. 7. Stanciu L.A., Kodash V.Y, Groza J.R. Effects of heating rate on densification and grain growth during field activated sintering of Al₂O₃ and MoSi₂ // Mat. Metal. Trans. – 2001. – №32. – p. 2633–2638. 8. Семко М.Ф., Узунян М.Д. и др. Работоспособность алмазных кругов. – К.: Техніка, 1983. – 96 с. 9. Яцерицын П.И., Зайцев А.Г. Повышение качества шлифованных поверхностей и режущих свойств абразивно-алмазного инструмента. – Минск: Наука и техника, 1972. – 478 с.

Поступила в редколлегию 12.06.2013