

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 зернами. 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 зерном посвящены фундаментальные работы, заложившие основы алмазно-абразивного шлифования и выполненные Давиденковым Н.Н., Кузнецовым В.Д., Полосаткиным Г.Д., Масловым Е.Н., Богомолковым Н.И., Сагардой А.А. и др. Анализ исследований по микрорезанию достаточно полно изложен в работах [1-4].

Однако особенности резания единичными алмазными зернами 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  $\sigma_M$ .

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 риски – 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  $\alpha$  – 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 риски-царапины  $S$ , которую

можно рассмотреть как сечение конуса плоскостью, проходящей через его вершину перпендикулярно основанию. Площадь сечения  $S = r_{кz}$  ( $z$  – высота) рассчитывалась по профилограммам в начале ( $S_1$ ) и конце ( $S_2$ ) каждого эксперимента, после чего определялся объем изношенной части зерна  $V_з = S_1 r_{к1} - S_2 r_{к2}$ . Таким образом,

$$R = \frac{V_{м}}{V_з} = \frac{(S_1 + S_2)L}{2,2(S_1 r_{к1} - S_2 r_{к2})}. \quad (9)$$

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.

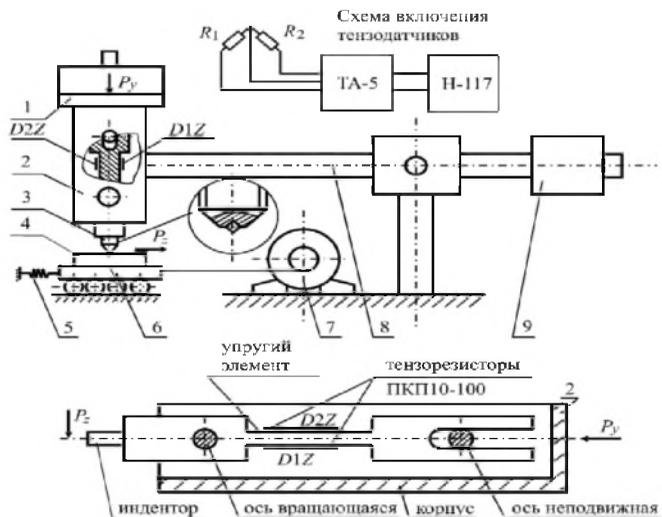


Рисунок 1 – Схема установки для микрорезания при небольших скоростях

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  $\sigma_M$ .

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).

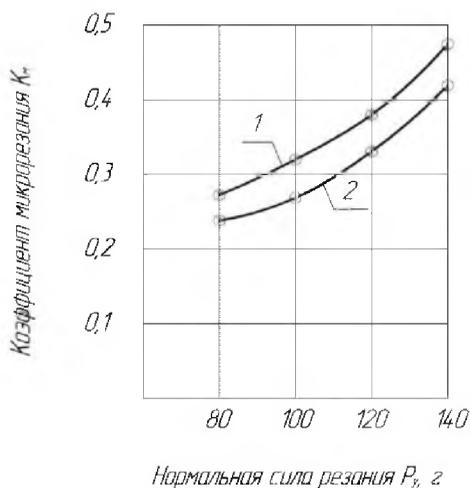


Рисунок 2– Влияние нормальной силы на коэффициент микрорезания:  
1 – VK6; 2 – «ВолКар»

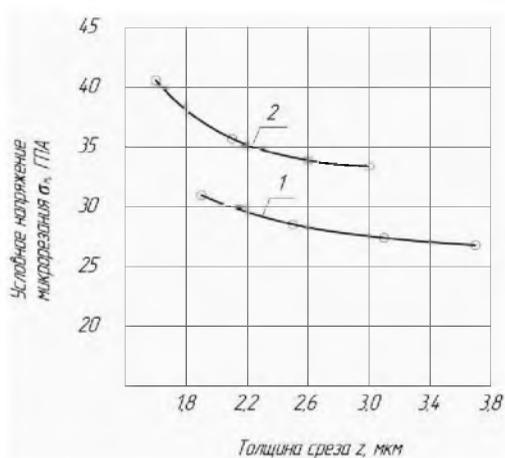


Рисунок 3 – Влияние толщины среза на условное напряжение микрорезания: 1 – VK6; 2 – «ВолКар»

Увеличение толщины среза, связанное с увеличением нормальной нагрузки, приводит к снижению условных напряжений для всех марок сплавов. При этом более интенсивное снижение  $\sigma_M$  имеет место в диапазоне меньших толщин среза. Следует отметить, что перегиба кривых  $\sigma_M$  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  $\sigma_M$  возникают при обработке наноструктурного сплава «ВолКар», меньшие – ВК6.

Таким образом, на основании полученных данных по  $K_M$  и  $\sigma_M$  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.

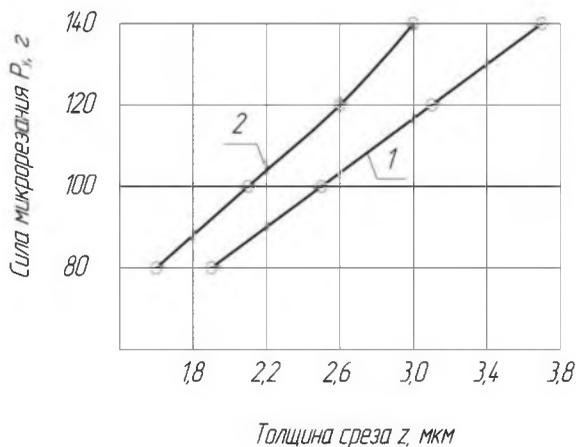


Рисунок 4 – Влияние толщины среза на нормальную составляющую усилия микрорезания: 1 – ВК6; 2 – «ВолКар»

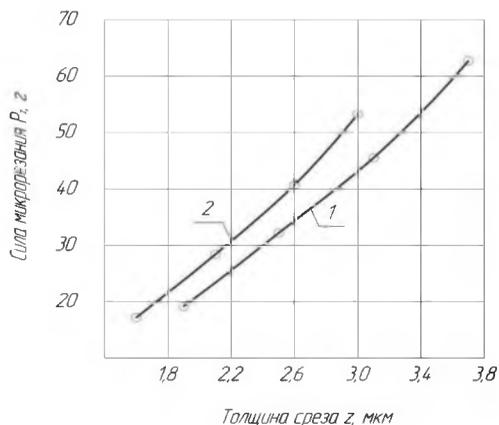


Рисунок 5 – Влияние толщины среза на тангенциальную составляющую усилия микрорезания: 1 – ВК6; 2 – «ВолКар»

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. Бабчинцев 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  $Al_2O_3$  and  $MoSi_2$  // 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