

*Дин Кай Цзянь*

канд. техн. наук, профессор

Технологический университет Китая

Китайская Народная Республика

## **КОНТАКТНЫЕ ПРОЦЕССЫ**

### **ПРИ РЕЗАНИИ КЕРАМИЧЕСКИМИ ИНСТРУМЕНТАМИ**

*Аннотация:* в статье приведены результаты экспериментальных исследований, позволившие связать характер контактного взаимодействия в широком диапазоне скоростей резания с условиями силового нагружения керамических инструментов. Показана возможность управления напряженным состоянием и эксплуатационными показателями керамических инструментов.

*Ключевые слова:* инструменты, высокоскоростное резание, контактные процессы.

#### *Введение*

Физические закономерности деформационных процессов при высокоскоростном резании являются актуальной областью исследований. В основе научного интереса к этой тематике – проблема повышения производительности механической обработки, с которой непосредственно связаны вопросы создания новых инструментальных материалов и режущих инструментов, обладающих повышенными эксплуатационными характеристиками [1]. Успешное решение этих вопросов, в свою очередь, зависит от степени изученности физики процесса высокоскоростного резания и характера изнашивания инструментов в этих условиях.

Специфические и недостаточно изученные контактные процессы при высокоскоростном резании не позволяют в окончательном виде определить технические требования к инструментам, ориентированным на эти условия эксплуатации. Это обстоятельство имеет особое значение для керамических инструментов, которые по комплексу свойств наиболее подходят для высокоскоростной обработки [2–3]. Это связано с тем, что при высокой скорости резания процессы пластической деформации обрабатываемого материала в зоне резания претерпевают существенные изменения [4]. Кроме того, крайне низкая теплопроводность керамических режущих пластин способна изменить тепловой баланс в зоне резания [5–7].

Цель проведенной работы – выявление закономерностей контактных процессов при высокоскоростном резании керамическими инструментами, позволяющих вскрыть природу износа и сформулировать подход к определению научно обоснованных требований, необходимых для совершенствования существующих и разработки новых марок режущей керамики.

#### *Методика эксперимента*

Методическое обеспечение экспериментальных исследований разработано с учетом сформулированных задач и условий эксплуатации керамических инструментов. Эксперименты выполняли на токарно-винторезном станке мод. 16К20 в широком диапазоне режимов резания:  $v = 5 \dots 1200$  м/мин,  $s = 0,075 \dots 0,8$  мм/об,  $t = 0,25 \dots 5$  мм. Исследования проводили при точении конструкционной стали 40Х (220...240 НВ), серого чугуна СЧ32 (180...220 НВ), молибденового сплава М-НП и никелевого сплава ХН77ТЮР.

В экспериментах использовали резцы, оснащенные режущими пластинами VO13, BOK71 и РКС22 формы SNGN 120408 (в отдельных исследованиях использовали режущие пластины специальных форм). Свойства керамических режущих пластин приведены в табл. 1. Для сравнения использовали режущие пластины из твердого сплава ВК6. Режущие пластины отбирали в случайном порядке с последующим внешним осмотром и измерением геометрических размеров. Надежную установку пластин в корпусе резцов обеспечивала схема крепления «прихват сверху». Резцы имели следующую геометрию режущей части:  $\gamma = -7^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$ ,  $\rho = 20 \dots 25$  мкм или  $f_\varphi \gamma_\varphi = 0,15$  мм х х  $10^\circ$ .

Таблица 1

Режущая пластина	Состав	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Твердость HRA	Предел прочности при изгибе $\sigma_i$ , МПа
VO13	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,9	91 – 92	400
BOK71	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -TiC	4,2 – 4,3	93 – 94	650
РКС22	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -TiC-Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,4	94	790

Деформационные процессы в зоне стружкообразования изучали на шлифах образцов с «неразрушенной» зоной резания и на шлифах, вырезанных из поверхностного слоя обработанных деталей. Для получения образцов с «неразрушенной» зоной резания использовали специально разработанное и изготовленное устройство (А. с. №1152715 от 3.01.85; №1226155 от 22.12.85). Такой подход объясняется тем, что анализ устройств, предназначенных для получения аналогичных образцов, показал, что ни одно из известных решений не удовлетворяет требованиям, определенным задачами настоящей работы.

При проектировании устройства были обеспечены следующие требования:

- надежная эксплуатация при высоких скоростях резания до 500 м/мин;
- исключение разрушения режущей пластины в момент получения образца;
- автоматизированное управление.

Созданное устройство удовлетворяет этим требованиям и позволяет получать высококачественные образцы с «неразрушенной» зоной резания за счет превышения скорости вывода режущей пластины из контакта с заготовкой над скоростью резания (рис. 1).

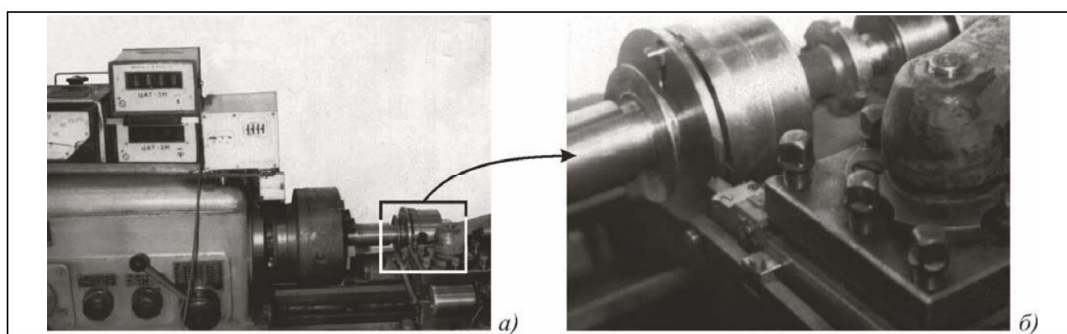


Рис. 1. Устройства для получения образцов с «неразрушенной зоной резания»:

а – общий вид устройства; б – рабочая зона устройства

Оно обеспечивает также высокую точность экспериментов за счет сокращения времени переходного процесса, динамических нагрузок и гарантированного превышения скорости вывода инструмента из зоны резания над скоростью резания.

Устройство позволяет получать образцы с «неразрушенной зоной резания» при свободном, несвободном и прерывистом высокоскоростном резании благодаря использованию поворотных державок разных исполнений.

Устройство предназначено для использования на токарном станке и состоит из планшайбы 1 с запрессованной втулкой 2, диска с ударником 3 и запрессованной бронзовой втулкой 4 и пальцем 5, которые посажены на цилиндриче-

скую шейку оправки 6 (рис. 2, а). Планшайба 1 жестко соединена с оправкой 6, а диск с ударником подпружинен пружиной 7. Рабочий электромагнит 8 навёрнут на резьбовое соединение оправки 6, фиксируется гайкой 9 и поджимается задним центром 10. Подвод питания к вращающемуся электромагниту осуществляется с помощью медных колец на прокладке 11 и щеток 12. Обрабатываемая деталь выполнена в виде диска 13, который так же как и шторка 14 крепится к планшайбе 1.

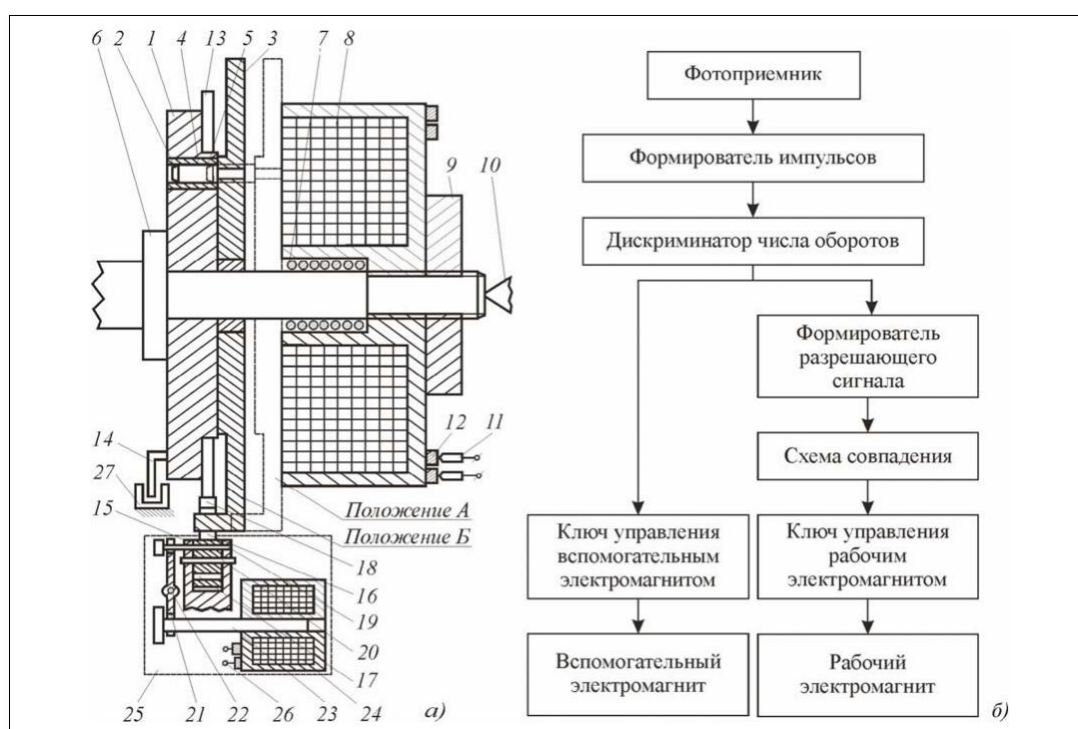


Рис. 2. Принципиальная схема (а) и система управления (б) устройства

для получения образцов с «неразрушенной» зоной резания

Резец устанавливается в резцедержателе и содержит вилкообразный корпус 15, поворотную державку 16, ось 17 и режущую пластину 18, которая установлена в пазу поворотной державки 16 и в процессе резания фиксируется силами резания. Поворотная державка фиксируется в рабочем положении срезным штифтом 19 и подвижным штифтом 20; последний посредством рычага 21, имеющего возмож-

ность перемещения в горизонтальной плоскости вокруг оси 22, соединен с сердечником 23 вспомогательного электромагнита 24, расположенного в резцедержателе 25 токарного станка. Подвод питания к вспомогательному электромагниту осуществлен через клеммы 26. К станку прикреплен фотоприемник 27.

Система управления содержит последовательно соединенные между собой фотоприемник (рис. 2, б), формирователь импульсов, дискриминатор числа оборотов, ключ управления вспомогательным электромагнитом и вспомогательный электромагнит. Вторая часть системы управления состоит из формирователя разрешающего сигнала, схемы совпадения, ключа управления рабочим электромагнитом и рабочего электромагнита.

При подготовке устройства к работе на переключателе системы управления устанавливают необходимое число оборотов до срабатывания, диск из обрабатываемого материала закрепляют на планшайбе, а режущую пластину устанавливают в гнездо поворотной державки. В процессе резания ударник, вращаясь синхронно с заготовкой, выведен из плоскости поворотной державки и удерживается в этом положении основным электромагнитом. При совпадении заданного числа оборотов с периодом резания система управления выдает сигнал на срабатывание вспомогательного электромагнита. С помощью этого электромагнита выводится подвижный штифт 20 из поворотной державки, после чего она фиксируется в рабочем положении только срезным штифтом 19. Размагничивание основного электромагнита означает выход ударника в плоскость поворотной державки с дальнейшим ее выводом из зоны резания.

Из образцов с «неразрушенной» зоной резания изготавливали шлифы для металлографических исследований с использованием пластин из синтетических алмазов марки САМ зернистостью 80/63, 28/20, 7/5 и 3/2 с концентрацией 100% и связкой МП. Окончательную полировку шлифов выполняли с использованием алмазной пасты АСМ зернистостью 1/0, нанесенной на плотную бумагу. Эта методика позволяла получать высококачественные шлифы без «завалов» их периферийных участков; после этого шлифы протравливали раствором азотной кислоты в спирте.

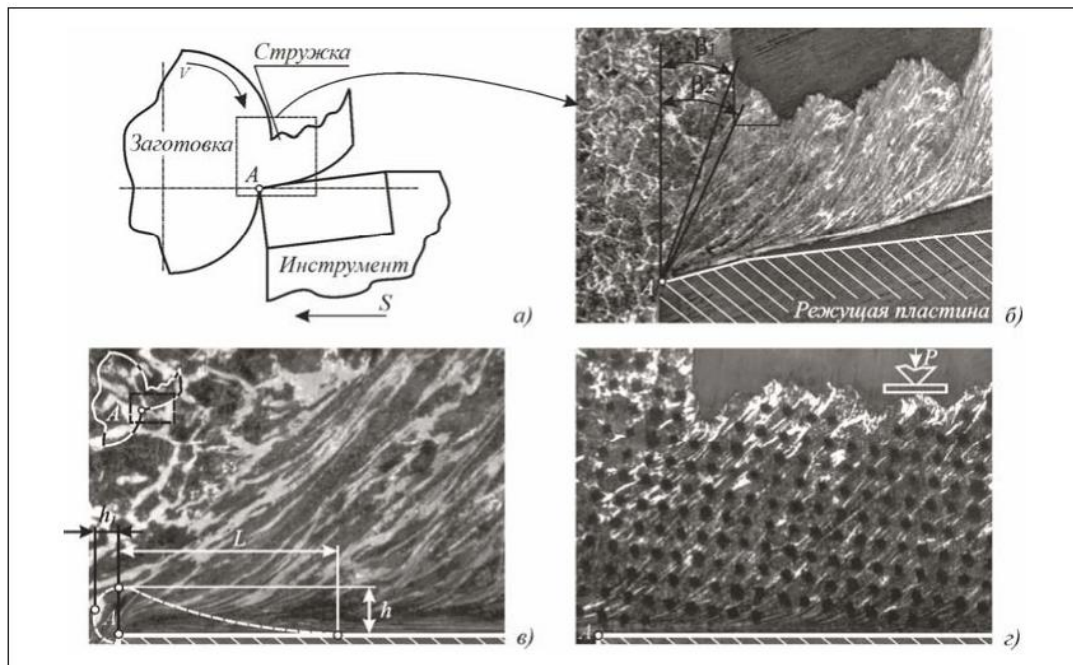


Рис. 3. Примеры определения контактных характеристик при резании:

а – схема резания; б – определение углов наклона условной плоскости сдвига  $\beta_1$  и  $\beta_2$ ; в – измерение параметров областей основных и дополнительных пластических деформаций; г – измерение микротвердости обрабатываемого материала в зоне резания

Образцы с «неразрушенной» зоной резания получали при свободном поперечном точении диска (сталь 40Х) шириной 2 мм (рис. 3, а). На шлифах образцов с «неразрушенной» зоной резания определяли расположение условной

плоскости сдвига, параметры областей основных и дополнительных пластических деформаций, а также микротвердость обрабатываемого материала. На рис. 3, б приведен пример определения углов наклона условной плоскости сдвига  $\beta_1$  и  $\beta_2$ , причем угол  $\beta_1$  измеряли между вектором скорости и проекцией на плоскость резания выступов пилообразной поверхности стружки, а угол  $\beta_2$  – между вектором скорости и проекцией на плоскость резания впадин пилообразной поверхности стружки. Ширину  $L$  и высоту  $h$  области основных пластических деформаций, а также высоту  $h_1$  дополнительных пластических деформаций измеряли по схеме, приведенной на рис. 3, в. В основе этих исследований находится анализ текстуры обрабатываемого материала. Построение полей твердости обрабатываемого материала в контактной зоне проводили по результатам измерений с использованием микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке  $P$  на индентор 100 г (рис. 3, г). В совокупности эти методы позволили получать детальную картину деформационных процессов в исследуемых областях. Фотографирование и измерение указанных контактных характеристик выполняли с использованием микроскопов БМИ-2Ц и ММР-4.

Длины полного, пластического и упругого контактов керамической режущей пластины со стружкой измеряли на передней и задней поверхностях режущих пластин, после стравливания налипков (рис. 4, а), которое проводили 30%-ным водным раствором соляной кислоты. Для обеспечения точности замеров этих контактных характеристик измерения также выполняли на прирезцовой поверхности стружки (рис. 4, б). Длины контактных площадок на рабочих поверхностях керамической режущей пластины измеряли на микроскопе



БМИ-2Ц. В качестве истинных размеров контактных площадок принимали их максимальные значения из десяти опытов.

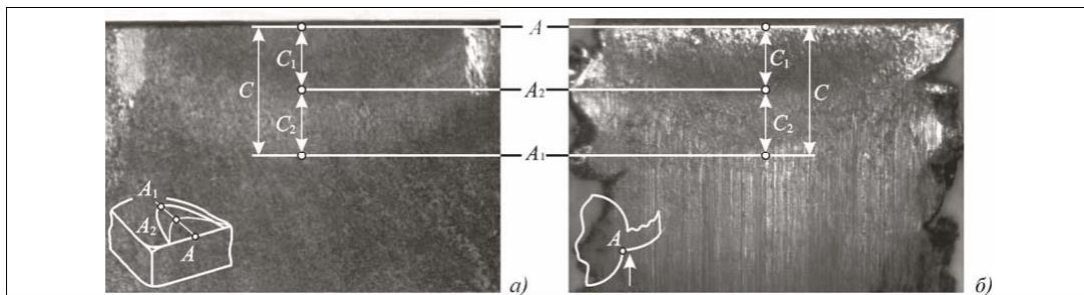


Рис. 4. Пример определения длины участков полного  $C$ , пластического  $C_1$  и упругого  $C_2$  контактов: а – на передней поверхности режущей пластины; б – на прирезцовой поверхности стружки

Составляющие силы резания измеряли универсальным динамометром УДМ-600, установленным на месте суппорта токарного станка и оснащенным комплектом измерительной аппаратуры (усилитель ГА-5 и осциллограф Н 117/1). Перед каждой серией опытов проводили тарировку динамометра. Для исключения влияния износа режущих пластин на силу резания в каждом опыте использовали их новую кромку.

#### *Результаты и их обсуждение*

Результаты исследования контактных процессов при резании керамическими режущими пластинами позволили выявить их основные закономерности [8]. Установлено значительное влияние скорости резания на характер деформационных процессов. Об этом свидетельствуют результаты изучения влияния высокоскоростного резания на характер стружкообразования, например форма стружки, образующейся при точении сплава ХН77ТЮР с  $v = 50 \dots 250$  м/мин ( $s = 0,15$  мм/об,  $t = 1$  мм) режущими пластинами из нитридной керамики РКС22.

При точении со скоростью резания, которую в настоящее время используют при обработке заготовок из этого сплава,  $v = 50$  м/мин формируется сливная стружка с радиусом завивания 50...100 мм в плоскости, нормальной к передней поверхности инструмента (рис. 5, а). Увеличение скорости резания до 100 м/мин приводит к образованию стружки в виде плоской винтовой спирали, состоящей из кольцеобразных сегментов диаметром не более 20 мм, на которых отчетливо просматриваются внешний пилообразный рельеф и отдельные разрывы сильно деформированного металла.

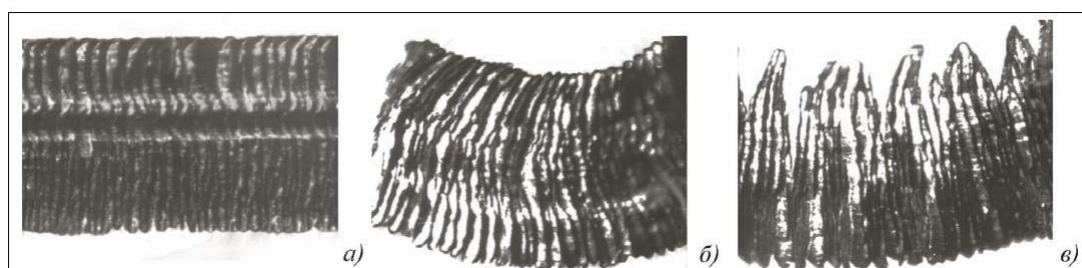


Рис. 5. Форма стружки, образующейся при точении сплава ХН77ТЮР при скоростях резания  $v$ : а – 50 м/мин; б – 150 м/мин; в – 200 м/мин

При точении с  $v = 150$  м/мин (рис. 5, б) стружка имеет вид плоских сегментов длиной 2...8 мм кольцеобразной формы с четко выраженными пилообразными выступами на внешней поверхности и большим числом разрывов сильно деформированного обрабатываемого металла. С увеличением скорости резания до  $v = 200$  м/мин (рис. 5, в) происходит некоторое спрямление сегментов стружки и увеличение числа отмеченных выше разрывов, длина которых достигает 25...30% от ширины стружки. Металлографические исследования показали, что эта стружка состоит из отдельных сегментов практически недеформированного обрабатываемого материала, соединенных тонким слоем металла (10...18 мкм) с сильно искаженной структурой. Микротвердость обраба-

тываемого материала в «прослойке» между соседними сегментами стружки превышает в 1,5 – 2 раза микротвердость материала внутри сегмента.

При точении с  $v = 250$  м/мин стружка состоит из отдельных элементов и дальнейшее увеличение скорости резания не изменяет ее форму, что свидетельствует о завершении перестройки деформационных процессов в зоне стружкообразования.

Исследование характера стружкообразования, проведенное при точении стали 40Х, в диапазоне скоростей резания  $v = 350 \dots 1000$  м/мин ( $s = 0,3$  мм/об,  $t = 1$  мм) режущими пластинами из разных керамических материалов показало следующее. При точении режущими пластинами ВО13 и ВОК71 формы образующейся стружки заметно различаются. Это связано с тем, что оксидная керамика ВО13 имеет меньший коэффициент теплопроводности, в результате чего происходит изменение теплового баланса в зоне резания по сравнению с режущими пластинами ВОК71 [9–10].

Увеличение скорости резания уменьшает степень искажения структуры обрабатываемого материала по объему стружки, ширину  $L$  и высоту  $h$  области основных пластических деформаций, а также высоту  $h_1$  области дополнительных пластических деформаций (табл. 2). С увеличением фаски износа задней поверхности керамических режущих пластин увеличиваются высоты  $h$  и  $h_1$  областей основных и дополнительных пластических деформаций соответственно. Например, при точении стали 40Х режущими пластинами ВОК71 с фаской износа  $h_3 = 0,4$  мм задней поверхности ( $v = 750$  м/мин,  $s = 0,3$  мм/об,  $t = 1$  мм) высота  $h_1$  области дополнительных пластических деформаций увеличивается в 2 раза и достигает значения 0,01 мм.

Таблица 2

Режущая пластина	Значения $L / h / h_1$ , мм, при различных скоростях резания $v$ , м/мин		
	150	400	750
ВО13	0,12/0,021/0,1	0,03/0,01/0,06	0,01/0,009/0,004
ВОК71	0,15/0,025/0,1	0,05/0,02/0,07	0,01/0,009/0,004
РКС	0,17/0,025/0,1	0,06/0,02/0,06	0,01/0,009/0,004

Скорость резания влияет на длину контакта стружки с передней поверхностью при точении стали 40Х разными керамическими режущими пластинами. Установлено следующее: после прекращения процесса резания на контактных площадках керамических режущих пластин обнаружены налипы обрабатываемого материала, несмотря на химическую инертность инструментального материала (рис. 6). Установлено, что морфология внешней поверхности налипов не зависит от марки режущей керамики и скорости резания.

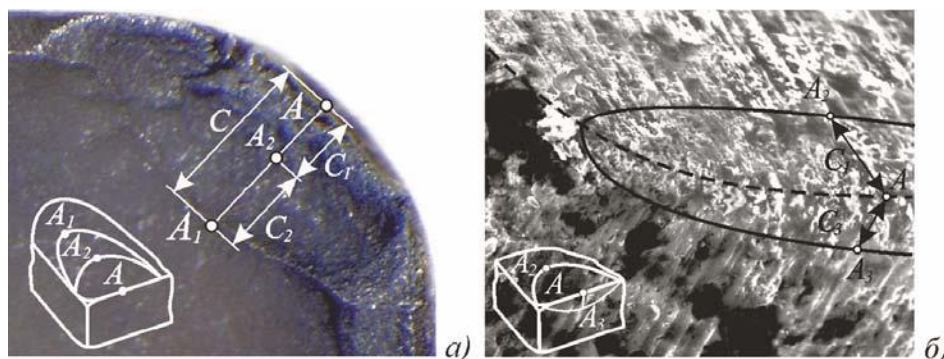


Рис. 6. Контактные площадки на режущей пластине ВОК71

до стравливания налипов обрабатываемого материала

(точение стали 40Х,  $v = 500$  м/мин,  $s = 0,3$  мм/об,  $t = 1$  мм)

На передней поверхности режущей пластины формируется площадка полного контакта  $AA_1$  (длиной  $C$ ) в результате схода стружки (рис. 6, а), а на задней поверхности режущей пластины – площадка контакта  $AA_3$  (длиной  $C_3$ ) в результате трения с обрабатываемой поверхностью (рис. 6, б). По морфологии

внешней поверхности налипков обрабатываемого материала контактные площадки поверхности на передней поверхности режущей пластины площадку полного контакта можно разделить (по структуре налипшего обрабатываемого материала) на две области. Эти области условно идентифицировали как участок пластического контакта  $AA_2$  (длиной  $C_1$ ) и участок упругого контакта  $A_2A_1$  (длиной  $C_2$ ) керамической режущей пластины со стружкой.

Из микрофотографии видно, что внешняя поверхность налипков обрабатываемого материала на участках  $C_1$  и  $C_3$  не имеет риска, являющихся основным признаком внешнего трения. Рельеф внешней поверхности налипков на этом участке имеет характерные очаги разрывов связей между соседними слоями обрабатываемого материала, что свидетельствует о реализации процесса внутреннего трения в обрабатываемом материале. В местах разрывов связей обнаружена некоторая волокнистость, характерная для разрушения сильно деформированных и вытянутых зерен металла. На площадке упругого контакта  $A_2A_1$  (длиной  $C_2$ ) на передней поверхности обнаружены дискретные налипсы обрабатываемого материала, которые также находятся в достаточно плотном контакте с режущей пластиной. На внешней поверхности налипков заметны риски, свидетельствующие о внешнем трении. В отдельных случаях эти риски распространяются на поверхность режущей пластины.

После удаления (стравливания) налипков обрабатываемого материалов с керамических режущих пластин на контактной площадке  $AA_1$  длиной  $C$  выделены две характерные области, имеющие разную морфологию поверхностей. На этих участках контактной площадки реализуются пластический  $C_1$  и упругий  $C_2$  контакты (рис. 7). На участке пластического контакта  $C_1$  во всем диапазоне скоростей

резания отсутствуют следы внешнего трения со стружкой. Однако именно на этом участке зафиксированы очаги первоначального разрушения режущих пластин в виде кратеров. Как видно из микрофотографии поверхности этого участка, уже через 60 с после начала работы на этом участке появляются эксплуатационные дефекты. На участке упругого контакта  $C_2$  аналогичных дефектов не выявлено, но обнаружены направленные следы абразивного воздействия на поверхность керамической режущей пластины и в области локального разрушения. Происхождение этих областей может быть связано с воздействием на поверхность керамической режущей пластины «частиц износа», которые выносятся из зоны резания перемещающейся стружкой керамической режущей пластины и в области локального разрушения. Происхождение этих областей может быть связано с воздействием на поверхность керамической режущей пластины «частиц износа», которые выносятся из зоны резания перемещающейся стружкой.

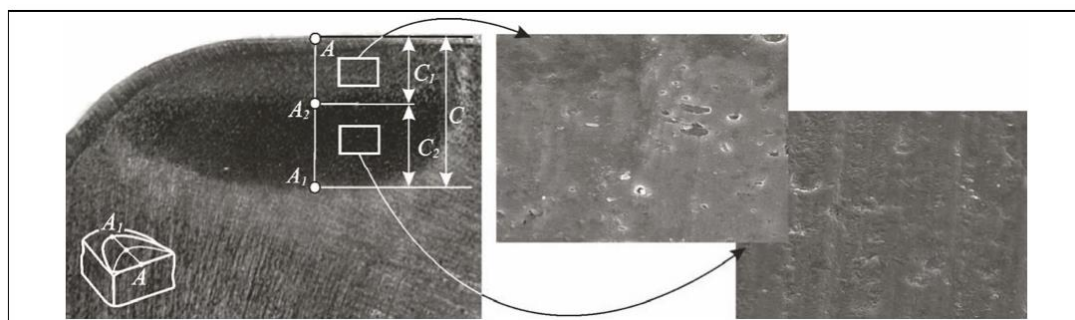


Рис. 7. Контактная площадка режущей пластины ВOK71  
после удаления наливов обрабатываемого материала  
(точение стали 40X,  $v = 500$  м/мин,  $s = 0,3$  мм/об,  $t = 1$  мм)

С увеличением скорости резания длины полного  $C$  и пластического  $C_1$  участков контактных площадок на передней поверхности керамических режущих пластин уменьшаются в среднем на 20...25% (рис. 8). Наибольшие значе-

ния длин  $S$  и  $S_1$  во всем диапазоне скоростей резания имеют пластины ВК6, а наименьшие – пластины ВО13, причем разница в длинах контактных площадок у разных режущих пластин уменьшается при увеличении скорости резания.

Одновременно с уменьшением длины полного  $S$  и пластического  $S_1$  участков уменьшаются составляющие  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  силы резания (рис. 9). Наименьшие значения  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  зафиксированы для режущей пластины ВО13, наибольшие – для пластины ВК6, а пластины ВОК71 имеют средние значения составляющих силы резания. При этом значения подачи при резании практически не влияют на характер этих зависимостей. Выявленная зависимость находится в хорошей корреляции с коэффициентом теплопроводности инструментального материала.

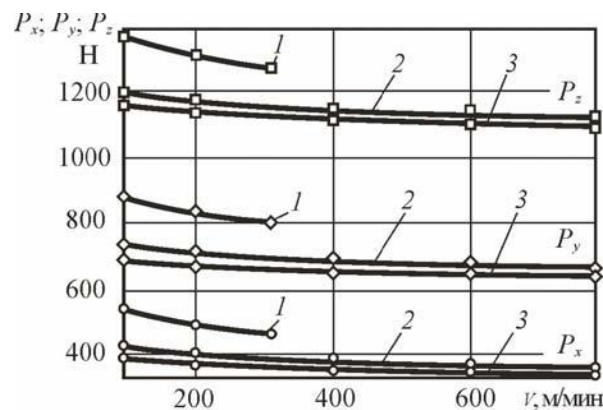


Рис. 9. Влияние скорости резания на составляющие силы резания при точении стали 40Х ( $s = 0,3$  мм/об,  $t = 1$  мм) инструментами с пластинами из ВК6 (кривая 1), ВОК71 (кривая 2) и ВО13 (кривая 3)

Для расчета составляющих силы резания получены следующие зависимости:  $P_z = A_1 v^B$ ,  $P_y = A_2 v^B$ ,  $P_x = A_3 v^B$ , где  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  и  $B$  – коэффициенты, значения которых приведены в табл. 3. Анализ этих коэффициентов показывает, что их наименьшие значения характерны для режущей пластины ВО13, а наибольшие – пластины ВК6. При точении чугуна СЧ32 режущими пластинами ВО13 и

ВОК71 значения  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  заметно уменьшаются до скоростей резания  $v = 600$  м/мин, а затем практически стабилизируются на определенном уровне. Изменение подачи и глубины резания не оказывает влияния на характер этих зависимостей. Уменьшение твердости обрабатываемого чугуна приводит к снижению составляющих силы резания.

Таблица 3

Коэффициенты	ВК6	ВОК71	ВО13
$A_1 / A_2 / A_3$	2033/1423/610	1552/1009/404	1326/865/357
B	- 0,0547	- 0,0231	- 0,0227

Выявлено значительное влияние скорости резания на амплитуду динамической составляющей  $\Delta P$  силы резания. Например, при точении стали 40Х резкое увеличение  $\Delta P$  происходит при  $v > 500$  м/мин ( $s = 0,3$  мм/об,  $t = 1$  мм), а ее наибольшие значения зафиксированы при  $v = 750$  м/мин. В этих условиях она увеличивается приблизительно в 5 раз по сравнению с  $\Delta P$  при  $v = 250$  м/мин. Уменьшение подачи до  $s = 0,15$  мм/об приводит к снижению динамической составляющей  $\Delta P$  силы резания практически в 3 раза.

В результате изнашивания режущих пластин ВО13 и ВОК71 составляющие силы резания при точении стали 40Х и чугуна СЧ32 возрастают. Например, увеличение фаски износа на режущей пластине ВОК71 до  $h_3 = 0,5$  мм при точении стали 40Х ( $v = 500$  м/мин,  $s = 0,3$  мм/об,  $t = 1$  мм) приводит к увеличению составляющих  $P_y$ ,  $P_x$  и  $P_z$  силы резания на 50...150% и уменьшению ее динамической составляющей  $\Delta P$  на 30%. Затупление режущей пластины ВОК71 неоднозначно влияет на силу резания при точении сплава М-НП. При точении с  $v = 15$  м/мин увеличение фаски износа задней поверхности режущей пластины



практически не изменяет силу резания, а при точении с  $v > 30$  м/мин режущими пластинами с фаской износа  $h_3 = 0,5$  мм задней поверхности сила резания увеличивается в 2 раза по сравнению с острозаточенными инструментами. При дальнейшем увеличении скорости резания эта тенденция сохраняется.

Анализ результатов исследований контактных площадок и составляющих силы резания показал, что степень влияния скорости резания на уменьшение длин контактных площадок выше, чем на уменьшение составляющих силы резания  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$ . В результате увеличение скорости резания приводит к повышению удельной силовой нагрузки  $P_{уд}$  на контактные площадки керамических режущих пластин (рис. 10). Очевидно, что это приводит к увеличению механической напряженности режущих пластин, причем свойства керамики оказывают значительное влияние на ее уровень.

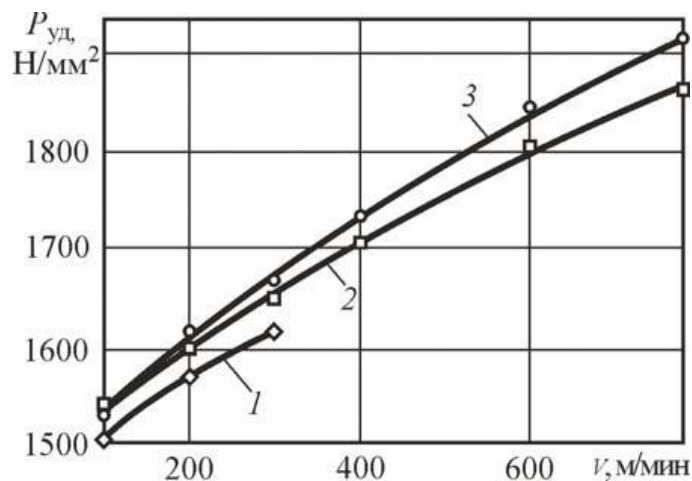


Рис. 10. Влияние скорости резания на удельную силовую нагрузку на режущие пластины ВК6 (кривая 1), ВК71 (кривая 2) и ВК13 (кривая 3) при точении стали 40Х ( $s = 0,3$  мм/об,  $t = 1$  мм)

*Выводы.*

1. Исследования, выполненные с использованием разработанной методики изучения контактных процессов при высокоскоростном резании, позволили связать процесс стружкообразования и характер контактного взаимодействия в системе «пластина-деталь-стружка» с условиями силового нагружения керамических режущих пластин.

2. На основе экспериментально выявленной взаимосвязи скорости резания и свойств керамических материалов с условиями силового нагружения режущих пластин определена возможность управления их напряженным состоянием и эксплуатационными показателями.

*Список литературы*

1. Андреев В.Н. Инструмент для высокопроизводительного и экологически чистого резания / В.Н. Андреев, Г.В. Боровский, С.Н. Григорьев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2010. – 480 с. – EDN RUOAHV

2. Кузин В.В. Исследование процесса высокоскоростного резания керамическими инструментами / В.В. Кузин // Вестник машиностроения. – 2004. – №3. – EDN SEUEDZ

3. Кузин В.В. Инструментальное обеспечение высокоскоростной обработки резанием / В.В. Кузин, С.Ю. Федоров, М.Ю. Федоров [и др.] // Вестник машиностроения. – 2005. – №9. – EDN HSHWRD

4. Верещака А.С. Функциональные покрытия для режущего инструмента / А.С. Верещака, А.А. Верещака // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – №6. – С. 28–37. – EDN MQPADD

5. Кузин В.В. Тепловое состояние керамических режущих инструментов при высокоскоростной обработке резанием / В.В. Кузин // Вестник машиностроения. – 2004. – №9. – EDN PJAQGD

6. Григорьев С.Н. Технология комбинированного поверхностного упрочнения режущего инструмента из оксидно-карбидной керамики / С.Н. Григорьев, М.А. Волосова // Вестник машиностроения. – 2005. – №9. – С. 32–36. – EDN HSHWPP

7. Григорьев С.Н. Модификация поверхности режущего инструмента из быстрорежущей стали путем вакуумно-плазменной обработки / С.Н. Григорьев, М.А. Волосова, В.Н. Климов // Физика и химия обработки материалов. – 2005. – №5. – С. 11–18. – EDN HSGNKZ

8. Гурин В.Д. Особенности контактных явлений на передней поверхности инструмента с износостойким покрытием при прерывистом резании / В.Д. Гурин, С.Н. Григорьев, В.А. Синопальников // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – №7. – С. 45–51. – EDN IBRTNB

9. Волосова М.А. Технологические принципы осаждения износостойких нанопокровий для применения в инструментальном производстве / М.А. Волосова, С.Н. Григорьев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2010. – №6. – С. 37–42. – EDN MQPADN

10. Григорьев С.Н. Компактный источник пара материала проводящей мишени, распыляемой ионами с энергией 3 кЭв при давлении 0.05 Па / С.Н. Григорьев, Ю.А. Мельник, А.С. Метель [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – №5. – С. 127–133. – EDN KWIGTT

11. Вестник МГТУ. – 2010. – №4 (12). – 188 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pdfslide.net/documents/-412-2010-.html?page=1> (дата обращения: 09.01.2024).