

Исследование режущих свойств и механизма изнашивания керамического лезвийного инструмента сnanoструктурированными многослойно-композиционными покрытиями

А.А. Верещака¹, Е.С. Сотова¹, А.Д. Батако², М.И. Седых¹, А.С. Верещака¹

¹ – ФБОУ ВПО Московский государственный технологический университет СТАНКИН, Москва, Россия;

² – Ливерпульский университет Джона Муреса, Ливерпуль, Великобритания

Study cutting properties and wear mechanism of ceramic blade tool with nanostructured multilayer composite coatings

A.A. Verschaka^{1a}, E.S. Sotova¹, A.D. Batako^{2b}, M.I. Sedih¹, A.S. Vereschaka¹

¹ Moscow State University of Technology (MSUT “STANKIN”), Vadkovsky per. 3a. 127055, Moscow, Russia

²Liverpool John Moores University, Byrom Street, Liverpool L3 3AF UK

^aecotech@rambler.ru, ^bm.volosova@stankin.ru, ^ba.d.batako@lju.ac.uk

В работе представлены результаты исследований режущих свойств и механизма изнашивания лезвийного режущего инструмента, оснащенного сменными многогранными пластинами (СМП) из режущей керамики (РК) с nanoструктурированными многослойно-композиционными покрытиями (НМКП) при резании высокотвердой стали. Показано, что применение НМКП позволяет управлять контактными процессами за счет изменения трения и длин плотного и полного контакта стружки и передней поверхности инструмента, что способствует снижению нормальных контактных напряжений и вероятности макро- и микро- разрушения контактных площадок инструмента.

Ключевые слова: режущая керамика (РК); покрытие; контроль контактных процессов, режущие свойства инструмента, механизм изнашивания

1. Введение

В настоящее время все большее применение в металлообрабатывающих производствах получают лезвийные режущие инструменты, оснащаемые сменными многогранными пластинами (СМП) из режущей керамики (РК), не содержащие в своем составе дефицитных элементов и обладающие высокой сопротивляемостью изнашиванию, особенно при повышенных температурах, возникающих в процессе резания.

При производстве лезвийных режущих инструментов из РК наиболее широко используют оксиды алюминия Al_2O_3 и нитрид кремния Si_3N_4 , которые являются основой для одно - и многокомпонентных систем. Добавление в оксидную керамику оксидов циркония, карбидов титана и армирование «нитевидными» кристаллами SiC существенно улучшает её свойства (рис. 1).



Рис.1. Основные типы режущей керамики, используемые при производстве режущих инструментов.

Основной особенностью режущей керамики (РК) является отсутствие связующей фазы, что значительно снижает степень её разупрочнения при нагреве в процессе изнашивания, повышает пластическую прочность и предопределяет возможность применения высоких скоростей резания, намного превосходящих скорости резания для инструмента из твёрдого сплава [1]. Отсутствие связующей фазы оказывает отрицательное влияние на эксплуатационные свойства лезвийного инструмента из РК. В частности, снижается хрупкая прочность, ударная вязкость, трещиностойкость РК, что оказывает сильное влияние на характер изнашивания инструмента, так как низкая трещиностойкость керамики является причиной формирования фронта трещин, которые из-за отсутствия пластической связующей фазы не встречают барьеров, способных затормозить или остановить их развитие. Указанное является главной причиной макро – и микро выкрашиваний режущих кромок керамического инструмента уже на стадиях приработочного или начального этапа установившегося изнашивания, а основной причиной полного отказа инструмента из РК является хрупкое разрушение режущей части инструмента. Отмеченный механизм изнашивания керамического режущего инструмента является превалирующим, причём фактически не зависит от скорости резания, так как температурный фактор не оказывает заметного влияния на трансформацию механизма изнашивания и в значительной степени определяет область применения керамического инструмента [1-3].

Особенности физико-механических свойств режущей керамики определяют и область её наиболее эффективного применения. В частности, керамический инструмент рекомендуют для чистовой обработки серых, ковких, высокопрочных и отбеленных чугунов, низко- и высоколегированных сталей, в том числе улучшенных и термообработанных (HRC₀ до 55–60), цветных сплавов, конструкционных полимерных материалов (K01–K05, P01–P05) (таблица 1). В указанных условиях инструмент, оснащённый пластиинами из режущей керамики, заметно превосходит по работоспособности твёрдосплавный инструмент.

Таблица 1. Области технологического применения основных марок режущей керамики (ISO 513:2004)

Чугуны (с пластинчатым, шаровидным и вермикулярным графитом, высокопрочные)			
K01	K10	K30	K30
Оксидная керамика (ЦМ-332, ВО-13, ВШ-13)			
Оксидно-карбидная керамика (В-3; ВОК-63; ВОК-71)			
Закалённые стали			
H01	H10	H20	H30
Оксидная керамика (ЦМ-332, ВО-13, ВШ-13)			
Оксидно-карбидная керамика (В-3; ВОК-63; ВОК-71; ВОК-200)			
Труднообрабатываемые сплавы			
M01	M10	M20	M30
Нитридная керамика (РК-30)			
Конструкционные стали в состоянии поставки			
P01	P10	P20	P30
Оксидно-карбидная керамика (В-3; ВОК-63; ВОК-71, ВОК-200)			

Условия применения лезвийного режущего инструмента, оснащенного сменными многогранными пластиинами (СМП) из режущей керамики (РК), обусловлены особенностями физико-механических и теплофизических свойств оксидной и нитридной керамики и существенно отличаются от условий применения лезвийного инструмента из твердых сплавов [1-3]. С учетом особых условий эксплуатации керамического режущего инструмента при повышенных скоростях резания и относительно невысоких значениях глубин резания и подач происходит существенное изменение контактных процессов, механизмов стружкообразования, характера и уровня силовых и температурных нагрузок, термомеханической напряженности режущей части инструмента, что приводит к трансформированию механизма изнашивания инструментов [1,2]. Выявление основных

закономерностей направленного управления контактными процессами при резании керамическим инструментом позволяет прогнозировать существенное повышение его эффективности. Это возможно за счет трансформирования механизма изнашивания контактных площадок инструмента в результате хрупкого микро- и макро разрушения к сбалансированному изнашиванию контактных площадок передней и задней поверхностей инструмента, характерному для более пластичного твердосплавного инструмента. Наиболее приемлемым технологическим средством целенаправленного управления контактными процессами при резании инструментом из РК является формирование на его контактных площадках функциональных покрытий различного состава, структуры и свойств, существенно изменяющих условия трения, термодинамическое воздействие на инструмент и характер изнашивания инструмента.

Таким образом, целью настоящего исследования является повышение эффективности керамического инструмента путем применения функциональных покрытий для направленного управления контактными процессами, изменения термомеханической напряженности режущей части инструмента и характера его изнашивания.

2. Предпосылки

Контакт двух тел осуществляется совокупностью точек и площадок, передающих нагрузку, в результате которой возникает напряженно-деформированное состояние контактирующих поверхностей. Давление стружки на режущий инструмент распределено неравномерно из-за стохастического характера формирования шероховатости взаимодействующих поверхностей, связанных с высоким уровнем термомеханического воздействия высоких температур, формирования различных типов пленок адсорбированного и оксидного характера на контактирующих поверхностях.

На рис. 2 показано распределение нормальных напряжений в системе координат, начало которой находится на передней поверхности инструмента в точке *A*, удаленной от режущей кромки на расстояние *C*, равное длине полного контакта стружки с передней поверхностью, а точка *A* соответствует месту её отрыва от передней поверхности.

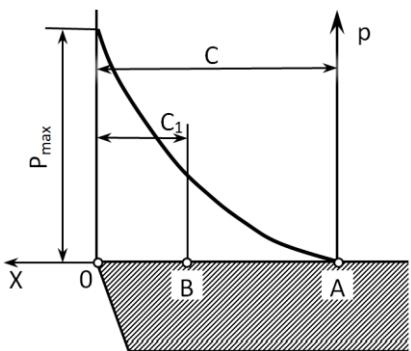


Рис. 2. Характерная кривая распределения нормальных контактных напряжений на передней поверхности инструмента [4].

По мере приближения к режущей кромке контактное давление возрастает и достигает у режущей кромки максимального значения P_{max} , при этом полную длину контакта *C* можно разделить на два участка, характерных для наиболее распространенных условий резания. Участок *OB*, обычно именуемый зоной плотного (пластического) контакта стружки и контактной площадки передней поверхности, соответствует области затормаживания металла стружки и, соответственно, области внутреннего трения. Участок *AB*, обычно именуемый зоной дискретного (упругого) контакта, соответствует области внешнего трения. Установлено [4], что около 90% всей нормальной и касательной нагрузки на переднюю поверхность инструмента приходится на участок *OB* внутреннего трения, поэтому весьма важно установить технологические средства управления протяженностью участка внутреннего трения. По мере удаления от режущей кромки нормальные контактные напряжения $P(x)$ снижаются. Согласно выражению (1) [2, 4]

$$P(x) = P_{max} \left(\frac{x}{C} \right)^n, \quad (1)$$

где *n* – показатель степени.

Большое значение для анализа явлений на передней поверхности инструмента имеет относительная длина k участка пластического контакта, которую можно оценить по формуле 2 [5]:

$$k = \frac{C_1}{C\gamma} = 1 - \sqrt{\frac{\tau_t - \tau_0}{P_{max} \cdot \beta(B)}}, \quad (2)$$

где C_1 – длина зоны пластического контакта (участка OB); τ_t – сопротивление сдвигу материала стружки; τ_0 – сопротивление сдвигу обрабатываемого материала; $\beta(B)$ – коэффициент упрочнения адгезионных связей (в точке B).

Очевидно, что увеличение k улучшает условия работы режущего клина инструмента, так как при этом значительная доля нагрузки по передней поверхности распределяется на относительно большем участке контакта. С другой стороны, уменьшение k ухудшает работоспособность режущей кромки, так как меньший участок, примыкающий к передней поверхности инструмента, будет воспринимать практически всю нагрузку, действующую на переднюю поверхность. Указанное является причиной возникновения сколов, макро- и микровыкрашиваний режущей кромки, снижающей работоспособность керамического инструмента [1-5]. Из выражения (2) следует, что на интенсивность адгезионного взаимодействия между инструментом и стружкой и соответственно на длину пластического контакта k наибольшее влияние оказывает коэффициент β упрочнения адгезионных связей. При увеличении β (при прочих равных условиях) k должен повышаться. Таким образом, можно утверждать, что любые мероприятия, уменьшающие адгезионное взаимодействие инструментального и обрабатываемого материалов (ИМ и ОМ) приводят к увеличению напряженности области, примыкающей к режущей кромке инструмента. Поэтому для достижения положительного эффекта необходимо увеличить прочность участка пластического контакта инструмента с ОМ [4].

Полная длина контакта стружки и инструмента $C\gamma$ возрастает с увеличением пластичности металла, теплопроводности ИМ и ОМ, подачи и уменьшением скорости резания. Отношение длины пластического контакта C_1 к общей его длине изменяется в широких пределах (0,3..0,8) в зависимости от физико-механических свойств ОМ и ИМ и скорости резания. Это определяет характер распределения контактных напряжений в зависимости от типа формируемой стружки, причем по мере приближения типа стружки к элементному, будет возрастать концентрация напряжений вблизи режущей кромки и влияние на механизм изнашивания режущего инструмента.

2.1. Роль покрытий в характере изменения контактных характеристик резания

Для оценки возможности управления с помощью покрытия контактными процессами и термодинамической напряженностью режущей части СМП из РК проведены экспериментальные исследования.

Оценивали влияние покрытий на такие ключевые параметры контактных процессов при резании, как полная длина контакта стружки с передней поверхностью СМП из РК $C\gamma$, коэффициент усадки стружки ξ , составляющие силы резания P_z и P_y , контактные нормальные σ и касательные напряжения на передней поверхности инструмента, а также сопротивление изнашиванию инструмента из РК и напряжение сдвига на поверхности контакта.

Методика исследований. Объектом исследования служили СМП из РК марок ВО13 (99% Al_2O_3 - 1% MgO), ВОК-71 (60% Al_2O_3 – 40% TiC) и высокопрочной слоистой керамика (ВСК), состоящей из твердосплавного субстрата (92%WC-8%Co) и слоя Al_2O_3 без покрытия и с покрытиями различного состава. Все СМП имели квадратную форму SNUN (03114-0370) с радиусом $r = 0,8$ мм, Для эксперимента использовали резцы с механическим креплением СМП из РК повышенной жесткости (в соответствии с регламентом по ГОСТ 8-82 и ГОСТ 18097), которые имели следующие значения геометрических параметров режущей части: $\gamma_\phi = -8^\circ$; $\alpha = 8^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 45^\circ$; $\lambda = 0$.

В качестве обрабатываемого материала использовали сталь ХВГ HRC 58..60 (ГОСТ 5950).

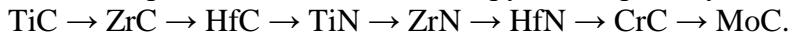
Процесс обработки осуществляли на станке мод. 16К20 с тиристорным приводом, позволяющим поддерживать скорость резания в заданном диапазоне при уменьшении диаметра заготовки.

Для получения необходимой информации о составляющих сил резания P_z и P_y использовали универсальный тензометрический динамометр УДМ – 600, оснащённый интерфейсом и компьютерной программой для обработки полученных экспериментальных данных.

При разработке концепции покрытий для керамического инструмента, учитывали особенности контактных процессов, возникающих при резании широкой гаммы конструкционных материалов инструментом из стандартной РК. К таким особенностям можно отнести:

- высокий уровень контактных (особенно нормальных) напряжений, возникающих на передней поверхности инструмента из РК вследствие интенсивного снижения длины (площади) контакта и существенно менее интенсивного уменьшения нормальных нагрузок, действующих на переднюю поверхность;
- концентрация температурных напряжений на контактных площадках передней и задней поверхностей инструмента, возникающих из-за чрезвычайно низкой теплопроводности керамики и снижения длин контакта (особенно по передней поверхности);
- практически полное отсутствие застойной зоны ОМ и возникающего при ее наличии народа, выполняющего функции защиты контактных площадок от изнашивания.

Результаты исследований, приведённые в работе [1,5,7] показали возможности влияния состава, структуры и свойств покрытий на функциональные параметры резания, характеристики контактных процессов и стружкообразование при резании твердосплавным режущим инструментом стали. Значения длин полного контакта C_γ , длины пластичного контакта $C_{\gamma 1}$, угла сдвига Φ , усадки стружки ξ , составляющих сил резания P_z и P_y зависят не только от состава покрытия, но и от его структуры. При этом значения параметров, влияющих на стружкообразование и контактные процессы, коррелируют с порядковым номером металла соединения (нитриды, карбиды) в каждой из групп (IV – VI) с некоторой аномалией для нитридов VI группы. Установлено уменьшение величин C_γ , $C_{\gamma 1}$, μ_γ , μ_a , ξ для карбидов и нитридов металлов IV – VI групп в порядке убывания:



В работе [1] отмечена также тенденция снижения значений C_γ , $C_{\gamma 1}$, μ_γ , μ_a , ξ при переходе от карбидов к нитридам, от карбидов тугоплавких металлов IV группы, для которых характерно превалирующее содержание СВАСК sp^3 , к карбидам металлов V и особенно VI групп, т.е. при увеличении содержания в покрытии СВАСК d^5 . Эта же тенденция отмечена и для нитридов по мере перехода от нитридов металлов IV группы (TiN , ZrN , HfN) к нитридам металлов V группы, т.е. при уменьшении содержания СВАСК s^2p^6 и росте СВАСК d^5 .

Исходя из рассмотренной концепции покрытий для субстратов из режущей керамики, для исследований были отобраны следующие составы многослойно-композиционных покрытий: - $\text{Ti}-(\text{Ti},\text{Al})\text{N}-\text{TiN}$; - $\text{Ti}-(\text{Ti},\text{Al})\text{N}$; - $(\text{Ti},\text{Al},\text{Zr},\text{Nb},\text{Cr})\text{N}$; - $(\text{Ti},\text{Al})\text{N}-(\text{Ti},\text{Cr},\text{Al})\text{N}$.

Нанесение покрытий на субстраты из ВКК производили на установке ВИТ-2 конструкции «СТАНКИН-ЭКОТЕК». Установка оснащена специальными источниками ионов, позволяющими реализовать несколько принципиально важных процессов. В частности, установка оснащена дополнительным модулем, позволяющим производить фильтрацию паро-ионного потока и сепарировать нейтральные частицы (микрокапельную фазу) в результате отклонения заряженных частиц ионного потока (ионов, электронов) мощным магнитным полем. Кроме того, данный модуль может выполнять роль ускорителя ионов, служить источником электронов для термоактивации инструмента и источником высокозаряженных ионов газа (например, азота) для стимулированной химико-термической обработки инструмента [5].

С учетом низкой электропроводности субстратов из РК была разработана специальная технология синтеза покрытий на основе использования источников низко- и среднеэнергетической плазмы (газовой и газометаллической), разделения процессов

термоактивирования и очистки поверхности субстрата, гашения микродуг и сепарации капельной составляющей, особенно при использовании элементов с относительно низкой атомной массой (Al, Ti и др.).

Технология получения покрытий для СМП из РК включала:

- предварительную очистку и мойку пластин;
- загрузку пластин в вакуумную камеру установки;
- предварительную (глубокую) вакуумизацию камеры;
- ионную очистку поверхности пластин и термическую активацию пластин;
- конденсацию адгезионно-упрочняющего слоя; синтез износостойкого слоя.

3. Исследование контактных процессов при резании

Составляющие силы резания P_z и P_y определяли экспериментально, остальные характеристики контактных процессов рассчитывали теоретически по следующее методике. Относительную длину контакта стружки с резцом определяли при использовании зависимости [6,7]:

$$\frac{c}{a} = \xi^{0,1} \left[\xi(1 - \operatorname{tg} \gamma) + \frac{1}{\cos \gamma} \right], \quad (3)$$

где a – толщина срезаемого слоя; ξ – усадка стружки; γ – передний угол.

Усилия резания рассчитывали по формулам [3]:

$$P_z = \tau_y \frac{a \cdot b}{\sin \Phi} \cdot \frac{\cos(\rho - \gamma)}{\cos(\rho + \Phi - \gamma)}, \quad (4)$$

$$P_y = \tau_y \frac{a \cdot b}{\sin \Phi} \cdot \frac{\sin(\rho - \gamma)}{\cos(\rho + \Phi - \gamma)}, \quad (5)$$

где a и b – толщина и ширина срезаемого слоя соответственно;

Φ – угол сдвига

$$\operatorname{tg} \Phi = \frac{\cos \gamma}{\xi - \sin \gamma}, \quad (6)$$

ρ – угол трения

$$\rho = 90^\circ + \gamma - 2\Phi \quad (7)$$

τ_y – сопротивление пластическому деформированию по плоскости сдвига

$$\tau_y = 0,53\sigma_B 6^{0,6\delta} \quad (8)$$

σ_B – временное сопротивление ОМ, МПа; δ – относительное удлинение, %.

Выражая ρ через γ и Φ и подставив полученное выражение в (4), получим:

$$P_z = 2\tau_y \frac{ab}{\operatorname{tg} \Phi} \Rightarrow \operatorname{tg} \Phi = \frac{2\tau_y ab}{P_z}. \quad (9)$$

Приравнивая (6) и (9), получим:

$$\xi = \frac{P_z \cos \gamma}{2\tau_y ab} + \sin \gamma. \quad (10)$$

Подставив (10) в (3) и используя формулы приведения, получим выражение для расчёта полной длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента:

$$C\gamma = a \left(P_z \frac{\cos \gamma}{2\tau_y ab} + \sin \gamma \right)^{0,1} \left(P_z \frac{\sqrt{2} \cos(\gamma + \frac{\pi}{4})}{2\tau_y ab} + \sqrt{2} \sin(\gamma + \frac{\pi}{4}) \right), \quad (11)$$

Коэффициент трения по передней поверхности рассчитывали при использовании формулы [6]:

$$\mu_\gamma = \operatorname{tg} \eta \quad (12)$$

где η – средний угол трения по передней поверхности [7]:

$$\operatorname{tg}(\eta - \gamma) = \frac{P_y}{P_z}, \quad (13)$$

Используя выражения (12) и (13), получим:

$$\mu_\gamma = \operatorname{tg}(\operatorname{arctg} \frac{P_y}{P_z} + \gamma), \quad (14)$$

Проведенные эксперименты позволили получить данные и рассчитать контактные характеристики инструмента, оснащённого СМП из ВСК без покрытия и с покрытиями различного состава при сухом точении закалённой стали ХВГ с $t = 0,1$ мм; $S = 0,1$ мм/об; $v = 250$ м/мин, результаты которых представлены в табл. 3.

Таблица 3. Контактные характеристики при резании закалённой стали ХВГ.

Инструментальный материал	C_γ , мм	Φ , °	μ_γ	ξ	P_z , Н	P_y , Н
BCK	0,1368	23	1,663	2,202	21,999	51,779
BCK – Ti-(Ti,Al)N-TiN	0,1373	19	2,286	2,668	22,207	79,375
BCK – Ti-(Ti,Al)N	0,1375	21	1,990	2,446	22,178	65,587
BCK – (Ti,Al,Zr,Nb,Cr)N	0,1377	24	1,420	2,036	22,124	43,149

C_γ – длина полного контакта стружки; Φ – угол сдвига; μ_γ – коэффициент трения по передней поверхности; ξ – усадка стружки, P_z и P_y – соответственно тангенциальная и радиальная составляющие силы резания.

Контактные напряжения по передней поверхности σ_N и τ_N определяли с учетом допущения о том, что касательные напряжения в условной плоскости сдвига τ_ϕ для условий течения стали ХВГ можно считать практически неизменными. По данным [59] $\tau_\phi \text{ХВГ} = 603 \cdot 10^{-5}$ Н/м². С учётом изложенного средние касательные напряжения на передней поверхности инструмента q_F определяли при использовании зависимости:

$$q_F = \frac{\tau_\phi \cdot \xi}{C_\gamma / a_{\text{ЭКВ}}}. \quad (15)$$

Средние нормальные контактные напряжения q_N на передней поверхности инструмента определяли согласно методике, предложенной в работе [3]:

$$q_N = \frac{a_{\text{ЭКВ}}}{C_\gamma} \cdot \frac{\tau_\phi}{\sin \Phi \cos(\Phi - \gamma)} + q_F \operatorname{tg}(\Phi - \gamma), \quad (16)$$

По экспериментальным данным, приведённым в работе [52] величины τ_ϕ и q_F являются постоянными для каждого материала. Следовательно, главными параметрами, определяющими величину q_N , являются: отношение толщины среза к общей длине контакта инструмента со стружкой $a_{\text{ЭКВ}}/C_\gamma$, усадка стружки ξ (через угол действия Φ) и величина переднего угла γ .

По данным [52, 56] средние нормальные контактные напряжения q_N на передней поверхности инструмента определяются с использованием зависимости вида

$$q_N = \frac{A_\gamma}{\xi^m l}, \quad (17)$$

где l – показатель степени зависимости между усадкой стружки и относительной длиной контакта; A_γ и m – коэффициент и показатель степени, определяются по данным проведенных различными авторами экспериментальных исследований передним углом:

$$A_\gamma = f(\sigma_{Nmax}, \gamma). \quad (18)$$

Параметр q_N чаще всего представляют в виде:

$$q_N = \frac{k \cdot \sigma_{Nmax}}{\xi^l} \Rightarrow \sigma_{Nmax} / q_N = k' \cdot \xi^l, \quad (19)$$

где k' – постоянный коэффициент;

Таким образом, с достаточной степенью достоверности максимальные нормальные контактные напряжения на передней поверхности инструмента можно рассчитать по формуле

$$\sigma_{Nmax} = 2q_N \cdot \xi^{0,5}. \quad (20)$$

По данным [53] нормальные контактные напряжения σ_N по длине контакта C_γ на передней поверхности инструмента распределяются по степенной функции с максимальным их значением на режущей кромке, а касательные контактные напряжения τ_γ имеют два участка: пластический, где они постоянны и выполняется условие: $\tau_\gamma = \tau_{max} = \tau_\phi$; и упругий, где они изменяются по степенной зависимости:

$$\sigma_N = \sigma_{Nmax} \cdot \left(\frac{x}{C_\gamma} \right)^n, \quad (21)$$

$$\tau_\gamma = \begin{cases} \tau_{max}, & x \leq C_{\gamma\text{пп}} \\ \tau_{max} \cdot \left(\frac{x}{C_\gamma - C_{\gamma\text{пп}}} \right)^n, & C_{\gamma\text{пп}} \leq x \leq C_\gamma \end{cases} \quad (22)$$

где $C_{\gamma\text{пп}}$ – длина пластического (плотного) контакта [51, 60]:

$$C_{\gamma\text{пп}} = a_{\text{ЭКВ}} [\xi (1 + \operatorname{tg} \gamma) + \sec \gamma]; \quad (23)$$

x – расстояние от точки отрыва стружки до рассматриваемой точки передней поверхности; n – показатель степени, который рассчитывали по зависимости, полученной в работе [58], исходя из соотношений (σ_{Nmax}/q_N) , определенных в результате обработки данных лазерной нанометрии деформирования инструмента при точении:

$$n = \frac{\sqrt{2}}{3\pi} \cdot e^{\frac{\sqrt{3}}{2}(\sigma_{Nmax}/q_N)}. \quad (24)$$

Распределения контактных напряжений на передней поверхности инструмента для СМП из ВКК без покрытия и с покрытием различных составов при сухом точении закаленной стали ХВГ HRC 58-60 представлены на рис. 3 и в таблице 4.

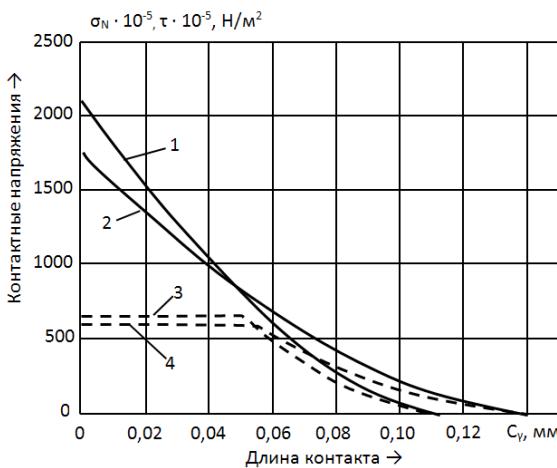


Рис.3. Распределение нормальных σ_N и касательных τ_F контактных напряжений на передней поверхности режущего инструмента при сухом точении стали ХВГ с:
 $t = 0,1$ мм; $S = 0,1$ мм/об; $v = 250$ м/мин; $\gamma = -24^\circ$).
1 – Нормальные напряжения на передней поверхности СМП из ВКК без покрытия
2 – Нормальные напряжения на передней поверхности СМП из ВКК с покрытием $(\text{Ti},\text{Al})\text{N} - (\text{Ti},\text{Cr})\text{N} - (\text{Ti},\text{Cr},\text{Al})\text{N}$
3 – Касательные напряжения на передней поверхности СМП из ВКК без покрытия
4 – Касательные напряжения на передней поверхности СМП из ВКК с покрытием $(\text{Ti},\text{Al})\text{N} - (\text{Ti},\text{Cr})\text{N} - (\text{Ti},\text{Cr},\text{Al})\text{N}$

Таблица 4. Параметры зависимости распределения контактных напряжений на передней поверхности при точении* стали ХВГ HRC 58..60 для пластин из ВСК

Инструментальный материал	C_γ , мм	$C_{\gamma n}$, мм	$\tau_F \cdot 10^{-5}$, Н/м ²	$q_F \cdot 10^{-5}$, Н/м ²	$q_N \cdot 10^{-5}$, Н/м ²	$\sigma_{Nmax} \cdot 10^{-5}$, Н/м ²	n
ВСК	0,114	0,0533	603	248,999	761,751	2103,165	1,639
ВСК – Ti-(Ti,Al)N-TiN	0,120	0,0542	603	243,622	739,220	2055,745	1,668
ВСК – Ti-(Ti,Al)N	0,174	0,0549	603	172,612	515,704	1454,214	1,725
ВСК – (Ti,Al,Zr,Nb,Cr)N	0,120	0,0538	603	240,130	734,616	2028,249	1,639
ВСК – (Ti,Al)N-(Ti,Cr)N-(Ti,Cr,Al)N	0,141	0,0538	603	207,285	624,020	1747,627	1,697

C_y – длина полного контакта по передней поверхности; $C_{\gamma n}$ – длина пластического (плотного) контакта по передней поверхности; τ_F – касательные напряжения в условной плоскости сдвига; q_F – средние касательные напряжения на передней поверхности инструмента; q_N – средние нормальные контактные напряжения на передней поверхности инструмента; σ_{Nmax} – максимальные нормальные контактные напряжения на передней поверхности; n – показатель степени.

Полученные данные позволяют отметить следующее. Нанесение на рабочие поверхности инструмента из РК многофункциональных покрытий, различных по составу и структуре, позволяет управлять процессами контактного взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов. Это происходит в результате увеличения длины полного контакта стружки с передней поверхностью керамического инструмента за счет некоторого роста трения и увеличения адгезии с обрабатываемым материалом при лишь незначительном увеличении нормального давления, что благоприятно трансформирует термомеханическую напряженность режущего клина инструмента. Полученные результаты позволяют прогнозировать более благоприятные условия работы керамического инструмента и снижение вероятности внезапного отказа инструмента за счет хрупкого разрушения его режущего клина.

3.Исследование режущих свойств и изнашивания инструмента из РК

Для выявления влияния покрытий на стойкость СМП из РК были проведены исследования режущих свойств и механизма изнашивания режущего керамического

инструмента по методике, показанной выше. Результаты данных исследований представлены на рис.4.

Рис. 4. Зависимость износа пластин по задней грани от времени точения при обработке стали ХВГ HRC 58..60 ($t = 0,1$ мм; $S = 0,1$ мм/об; $v = 250$ м/мин):

1- контрольный инструмент из ВСК; 2 – ВСК-Ti-TiAlN; 3- ВСК-TiAlN-TiN; 4 – ВСК-TiAlZrNbCrN; 5 – TiAlN-TiCrN-TiCrAlN.

Полученные зависимости « h_3-t » для СМП из ВСК с различными вариантами покрытий имеют характерную для таких кривых форму. Покрытие уменьшает интенсивность изнашивания (скорость изнашивания) керамического инструмента в области нормального износа. Сопоставление моделей резания при продольном точении СМП из ВСК без покрытия и СМП с покрытиями показывает, что величина износа инструмента с покрытием при прочих равных условиях меньше, чем износ инструмента без покрытия. Рост износа с течением времени у инструментов из ВСК с покрытием происходит менее интенсивно, изменения, в некоторых случаях, и его характер от усталостного выкрашивания к абразивному истиранию с элементами адгезионного схватывания.

Для определения зависимости стойкости режущего инструмента (времени резания инструмента до его замены) из ВКК от режима резания в настоящей работе применяли экспериментальный метод исследования с использованием функции степенного вида:

$$R = C \cdot \prod_{i=1}^n z_i^{\alpha_i} \quad (25)$$

Преимуществом данной модели является возможность ее преобразования в линейный вид путем логарифмирования

$$\ln R = \ln C + \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \ln z_i \quad (26)$$

В качестве метода планирования эксперимента использовали метод наименьших квадратов с рациональным планом многофакторного эксперимента, который можно представить в виде p сочетаний n факторов, варьируемых на s уровнях. Число уровней варьирования определяется порядком модели, а число опытов, необходимое и достаточное для однозначной оценки неизвестных параметров модели $(C, \alpha_1, \dots, \alpha_n)$, равно числу неизвестных параметров модели. Уровни варьирования факторов (элементов режима резания) были приняты равными обычно рекомендуемым при чистовом точении закаленных конструкционных сталей керамическим инструментом.

Значение коэффициентов C , экспонентов α_i математической модели определяли исходя из реализованных в экспериментах значений факторов резания (t, S и v) и параметров резания (T_1, \dots, T_5) методом наименьших квадратов.

Обработку опытных данных осуществляли на ПЭВМ IBM PC по разработанной на кафедре «Высокоэффективные технологии обработки» ГОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН» программе.

Результаты обработки опытных данных приведены в таблице 5.

Таблица 5

Параметры математической модели резания.

	C_i	α_{i1}	α_{i2}	α_{i3}
ВСК	T_1	957, 630	-1,850	-0,081
ВСК – Ti-(Ti,Al)N-TiN	T_2	0,147	-1,069	-2,903
ВСК – Ti-(Ti,Al)N	T_3	$1,850 \cdot 10^5$	-2,344	-2,168
ВСК – (Ti,Al,Zr,Nb,Cr)N	T_4	$2,742 \cdot 10^{14}$	-2,135	-2,215
ВСК – (Ti,Al)N-(Ti,Cr,Al)N	T_5	$2,112 \cdot 10^7$	-0,063	-1,754

В результате проведенных экспериментов, а также проверки адекватности полученной модели и оценки значимости коэффициентов регрессии получено выражение зависимости стойкости инструмента от режимов резания при точении стали ХВГ:

а) резцами, оснащенными СМП из ВКК без покрытия:

$$T = \frac{957,630}{t^{1,850} S^{0,081} v^{1,866}}, \text{ мин; } \quad (27)$$

б) резцами, оснащенными СМП из ВКК с покрытием Ti-(Ti,Al)N-TiN:

$$T = \frac{0,147}{t^{1,069} S^{2,903} v^{1,007}}, \text{ мин; } \quad (28)$$

в) резцами, оснащенными СМП из ВКК с покрытием Ti-(Ti,Al)N:

$$T = \frac{1,850 \cdot 10^5}{t^{2,344} S^{2,168} v^{3,706}}, \text{ мин; } \quad (29)$$

г) резцами, оснащенными СМП из ВКК с покрытием (Ti,Al,Zr,Nb,Cr)N:

$$T = \frac{2,742 \cdot 10^{14}}{t^{2,135} S^{2,215} v^{7,473}}, \text{ мин; } \quad (30)$$

д) резцами, оснащенными СМП из ВКК с покрытием (Ti,Al)N-(Ti,Cr)N-(Ti,Cr,Al)N:

$$T = \frac{2,112 \cdot 10^7}{t^{0,063} S^{1,754} v^{3,209}}, \text{ мин. } \quad (31)$$

Наилучший результат по стойкости показали СМП из ВСК с покрытием (Ti,Al)N-(Ti,Cr)N-(Ti,Cr,Al)N.

Из полученных зависимостей стойкости видно, что с увеличением скорости резания стойкость резко снижается. При этом СМП с покрытием (Ti,Al)N-(Ti,Cr)N-(Ti,Cr,Al)N при равной скорости обеспечивали более высокую стойкость, а при равной стойкости позволяют использовать более высокую скорость резания (в 3..5 раз) по сравнению с исходным образцом без покрытия.

Таким образом, проведенные стойкостные исследования инструмента, оснащенного СМП из ВСК, позволяют отметить существенное влияние покрытия на характер изнашивания инструмента и снижение интенсивности его изнашивания.

Conclusion; Заключение

Разработана методика повышения режущих свойств инструмента, оснащённого СМП из режущей керамики с многослойно-композиционными покрытиями, при обработке закалённых сталей, позволяющая повысить стойкость керамического инструмента в 2...2,5 раза по сравнению со стойкостью инструмента без покрытия.

Установлена роль покрытия на контактных площадках режущего керамического инструмента, как промежуточной технологической среды, позволяющей управлять контактными процессами за счет варьирования длины контакта стружки с передней поверхностью, снижения удельных термомеханических напряжений и улучшения теплоотвода из зоны резания.

Разработаны динамические математические модели процесса резания закаленной стали, устанавливающие зависимости стойкости инструмента, оснащенного СМП из ВСК без покрытия и с покрытиями различного состава, его износа по задней поверхности.

References, Литература

1. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1993, 336 с.
2. Кузин В.В. Инструменты с керамическими режущими пластинами. М.: Янус-К, 2006. 160 с.
3. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с.
4. Шустер Л.М. Адгезионное взаимодействие режущего инструмента с обрабатываемым материалом. – М.: Машиностроение, 1988. – 96 с.: ил.
5. Vereshchaka, A.A., Vereshchaka, A.S., Mgaloblishvili, O., Morgan, M.N., Batako, A.D. Nano-scale multilayered-composite coatings for the cutting tools. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer-Verlag London,

6. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
7. Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов. М.; Высшая школа, 2009. 535 с.
8. Vereschaka A.S., Vereschaka A.A., Kirillov A.K., Ecologically friendly dry machining by cutting tool from layered composition ceramic with nano-scale multilayered coatings. Key Engineering Materials, Vol. 496 (2012) pp 61-66/TTp, Trans Tech Publications. T.1. GD. JMU. 2011. P. 68-76.
9. Grigoriev S.N., Vereschaka A.A., Vereschaka, A.S., Kutin A.A. Cutting tools made of layered composite ceramics with nano-scale multilayered coatings. Procedia CIRP 1 (2012) 318 – 323.
10. Vereschaka A.S., Grigoriev S. N., Sotova E.S., Vereschaka A.A. Improving the efficiency of the cutting tools made of mixed ceramics by applying modifying nano-scale multilayered coatings. Advanced Materials Research Vols. pp.391-394. (2013) Trans Tech Publications, Switzerland.
11. Vereschaka A.S., Grigoriev S.N., Tabakov V.P., Sotova E.S., Vereschaka A.A., Kulikov M.Yu. Improving the efficiency of the cutting tool made of ceramic when machining hardened steel by applying nano-dispersed multi-layered coatings. Key Engineering Materials Vol. 581 (2014) pp. 68-73 Trans Tech Publications, Switzerland.
12. V.P. Tabakov., A.S. Vereschaka. Development of technological means for formation of multilayer composite coatings, providing increased wear resistance of carbide tools, for different machining conditions. Key Engineering Materials Vol. 581 (2014) pp 55-61. © (2014) Trans Tech Publications, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.581.5.
13. A.A. Vereschaka, A.S. Vereschaka, A.I. Anikeev. Carbide Tools with Nano-Dispersed Coating for High-Performance Cutting of Hard-To-Cut Materials. Advanced Materials Research Vol. 871 (2014) pp 164-170 © (2014) Trans Tech Publications, Switzerland doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.871.164.
14. A. M. Adaskin, A. A. Vereshchaka, and A. S. Vereshchaka. Study of Wear Mechanism of Hard Alloy Tools during Machining of Refractory Alloys. Journal of Friction and Wear, 2013, Vol. 34, No. 3, pp. 208–213. Allerton Press, Inc., 2013.

Acknowledgement

Данная работа финансировалась Министерством образования и науки РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности