

Д. т. н. В. В. Кузин (✉), к. т. н. С. Ю. Фёдоров, Н. Р. Портной

ФГБОУ ВПО «Московский государственный технологический университет «Станкин», Москва, Россия

УДК 621.924.93:666.3

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОКСИДНО-КАРБИДНОЙ КЕРАМИКИ ПРИ СТРУЙНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

Приведены результаты моделирования напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя оксидно-карбидной керамики при струйно-абразивной обработке с использованием разработанной методики исследования комбинации систем. Проанализированы деформации и напряжения в керамике системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO}$ под действием разных нагрузок. Определена возможность использования выявленных зависимостей для построения модели формирования поверхности керамики при струйно-абразивной обработке.

Ключевые слова: керамика, струйно-абразивная обработка, поверхностный слой, структурный элемент, напряженно-деформированное состояние, температура.

ВВЕДЕНИЕ

В результате струйно-абразивной обработки (CAO) керамических деталей улучшаются их эксплуатационные характеристики и надежность [1, 2]. Этот позитивный эффект определяется механизмом диспергирования поверхностного слоя керамики под действием струи абразивных частиц, обладающих высокой энергией и не связанных жесткими связями между собой [3, 4]. При проведении CAO керамических деталей при оптимальном режиме образуется поверхность с малой степенью дефектности по сравнению с дефектностью после алмазного шлифования; многократно уменьшается число трещин, сколов и областей локального разрушения в поверхностном слое [5, 6]. Однако после проведения CAO при неоптимальном режиме качество поверхностного слоя заметно ухудшается из-за образования четко выраженного шагреневого рельефа с хаотично распределенными кратерами, выступами и прямолинейными площадками [1, 7]. Поэтому детальное исследование механизма формирования поверхностного слоя керамических деталей при CAO является актуальной научной задачей, имеющей многочисленные инженерные приложения. Эту задачу решают экспериментальными [8–12] и теоретическими [13–17] методами.

В настоящей работе поставлена цель — изучить влияние силовой, тепловой и комбинированной нагрузок на напряженно-деформированное

состояние поверхностного слоя керамики системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO}$ при CAO с использованием метода численного моделирования и сравнить полученные результаты с данными работы [18], в которой проанализирована неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики системы $\text{TiC--MgO--Al}_2\text{O}_3$. Для достижения цели использовали разработанную методику исследования комбинации систем ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO}$ и $\text{TiC--MgO--Al}_2\text{O}_3$). Эти системы, сформированные на основе построенной микроструктурной модели поверхностного слоя оксидно-карбидной керамики, позволяют учесть случайное распределение зерен оксида алюминия (основная фаза) и карбида титана (упрочняющая фаза) на ее поверхности при моделировании [19].

Численные эксперименты проводили с использованием автоматизированной системы термомеханических расчетов RKS-ST v.1.0 [20]. В керамике системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO}$ зерно и матрица выполнены из оксида алюминия, межзеренная фаза — из оксида магния. Свойства этих материалов приведены в работе [20]. К центральной части свободной поверхности зерна прикладывали сосредоточенную силу $F = 0,005$ Н под углом $\alpha = 30^\circ$, тепловой поток $Q = 2,3 \cdot 10^{10}$ Вт/м² и комбинацию этих нагрузок ($F = 0,005$ Н ($\alpha = 30^\circ$) + $Q = 2,3 \cdot 10^{10}$ Вт/м²). Отвод тепла с поверхности зерна осуществляли с коэффициентом $h_a = 2 \cdot 10^5$ Вт/(м²·град), с поверхности межзеренной фазы — с $h_f = 1 \cdot 10^5$ Вт/(м²·град), с поверхности матрицы — с $h_m = 6 \cdot 10^5$ Вт/(м²·град).

Для анализа результатов численных экспериментов использовали метод контрольных точек (КТ) [21]. Выбранные КТ расположены во внутреннем объеме зерна (КТ1–КТ6); на по-



В. В. Кузин
E-mail: kuzena@post.ru

верхности зерна, примыкающей к межзеренной фазе (КТ7–КТ23); на поверхности межзеренной фазы, примыкающей к зерну; на поверхности межзеренной фазы, примыкающей к матрице и в матрице, примыкающей к межзеренной фазе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что характер деформации поверхностного слоя керамики системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO}$ зависит от вида прикладываемой нагрузки (рис. 1).

Под действием сосредоточенной силы F происходит «вдавливание» локальной области поверхности зерна в точке приложения силы, причем величина горизонтального перемещения δ_x этой точки имеет большее значение по сравнению с ее вертикальным перемещением δ_y (см. рис. 1, а). Под действием теплового потока Q происходит деформация конструкции по схеме «выдавливания» зерна из каркаса, который также подвергается некоторой деформации (см. рис. 1, б). В этом случае $\delta_x < \delta_y$. Под действием комбинированной нагрузки $F + Q$ в наибольшей степени деформируется свободная поверхность зерна за счет ее расширения (рис. 2, в). На этом участке зерна отсутствует след «вдавливания» от приложенной сосредоточенной силы.

Разный характер деформаций поверхностного слоя керамики системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO}$ определяет специфику изменения напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и интенсивности напряжений σ_i в этих случаях внешнего нагружения. В качестве примера на рис. 2 показан характер изменения σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i во внутреннем объеме и поверхностном слое зерна под действием разных нагрузок.

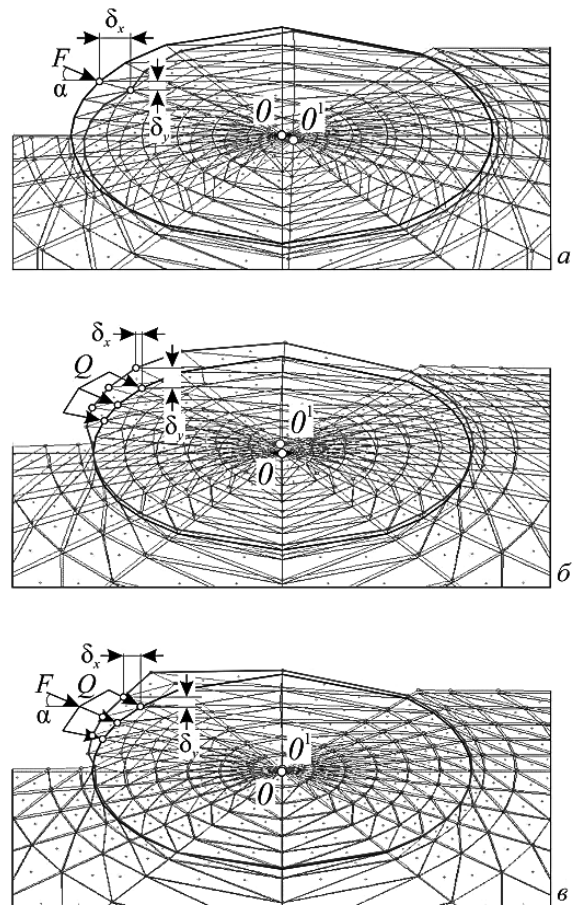


Рис. 1. Схемы деформации поверхностного слоя керамики системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO}$ под действием: а — $F = 0,005 \text{ Н}$ ($\alpha = 30^\circ$); б — $Q = 2,3 \cdot 10^{10} \text{ Вт/м}^2$; в — $F = 0,005 \text{ Н}$ ($\alpha = 30^\circ$) + $Q = 2,3 \cdot 10^{10} \text{ Вт/м}^2$

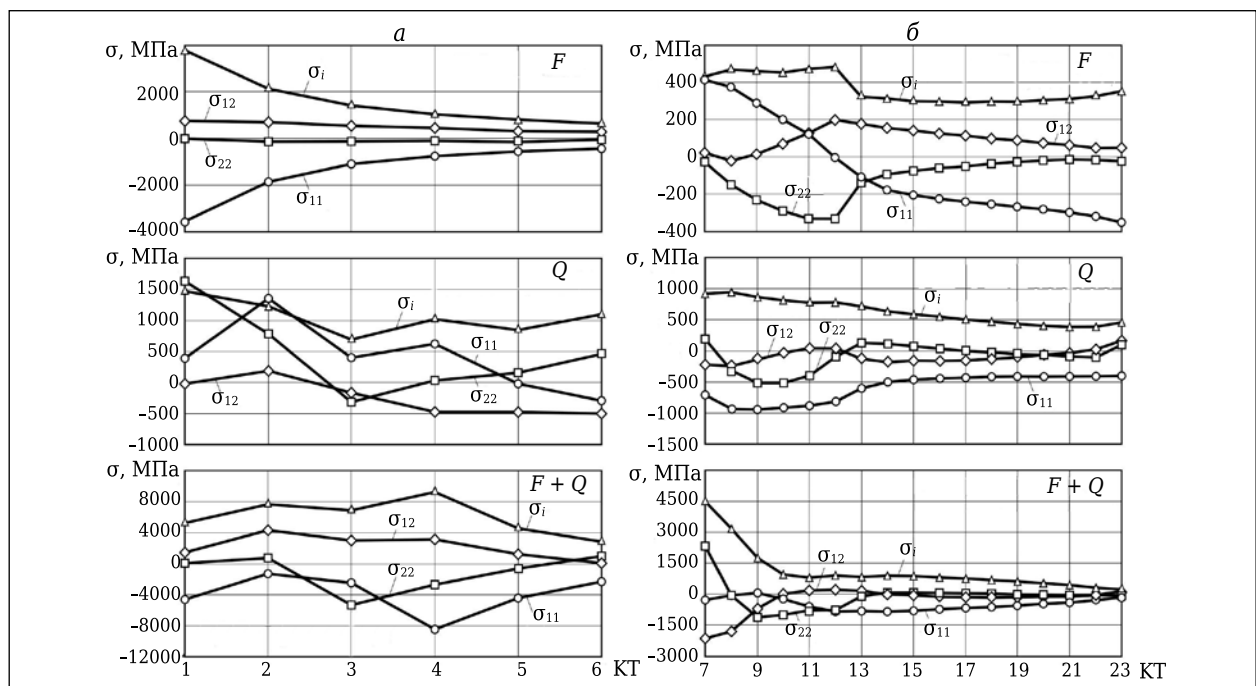


Рис. 2. Характер изменения напряжений σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и интенсивности напряжений σ_i во внутреннем объеме (а) и на поверхности (б) зерна керамики системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO}$ под действием разных внешних нагрузок (указаны на рисунке)

Во внутреннем объеме зерна σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i уменьшаются от его поверхности к центру под действием всех нагрузок (см. рис. 2, а). Под действием F σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i уменьшаются от -3549 до -425,6, от -152,5 до -9,1, от 747,3 до 287,6 и от 3773 до 640,5 МПа соответственно, под действием Q — от 1355 до -296,8, от 1627 до -320, σ_{12} от -505,9 до 183,2 и от 1474 до 687,7 МПа соответственно, под действием $F + Q$ — от -8480 до -1258, от -5342 до 914, от 4334 до 149,4 и от 9280 до 2831 МПа соответственно.

Характер изменения напряжений под действием разных нагрузок на поверхности зерна показан на рис. 2, б. Видно, что под действием F σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i изменяются от -353,4 до 411,9, от -13,4 до -337, от -20,1 до 202,6 и от 292,4 до 480,1 МПа соответственно, под действием Q — от -404,3 до -938, от -520,4 до 183,6, от -259,7 до 146,9 и от 372 до 937 МПа соответственно, под действием $F + Q$ — от -841,6 до 57,3, от -1115 до 2330, от -2184 до 201,9 и от 259 до 4540 МПа соответственно.

Проанализируем характер изменения напряжений на других выделенных поверхностях.

Установлено, что под действием F на поверхности межзеренной фазы, примыкающей к зерну, σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i изменяются от -317 до 337,7, от -210,6 до 18,1, от 27,8 до 208,4 и от 251,5 до 490,5 МПа соответственно, под действием Q — от -497,6 до -1189, от -624,1 до 312,5, от -286,1 до 560 и от 463,7 до 1475 МПа соответственно, под действием $F + Q$ — от -617,2 до -1227, от -867,2 до -4594, от -246,9 до 1567 и от 535 до 5755 МПа соответственно.

На поверхности межзеренной фазы, примыкающей к матрице, под действием F σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i изменяются от -387,3 до 1076, от -320 до 111,1, от -54,8 до 165,8 и от 279,2 до 1041 МПа соответственно, под действием Q — от -1135 до 1133, от -697 до 100,6, от -291,4 до 874,4 и от 431 до 1887 МПа соответственно, под действием $F + Q$ — от -1328 до 5564, от -1154 до 2093, от -471 до 4081 и от 485,7 до 8582 МПа соответственно.

На поверхности матрицы, примыкающей к межзеренной фазе, под действием F σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i изменяются от -289 до 377,2, от -199,3 до 43,1, от 20,5 до 178,2 и от 178 до 476,8 МПа соответственно, под действием Q — от -961 до -449,6, от -349 до 431,3, от -135,3 до 369,1 и от 486 до 1244 МПа соответственно, под действием $F + Q$ — от -856,3 до 156,8, от -576,8 до 2071, от -323,5 до 1084 и от 474,7 до 2669 МПа соответственно.

В обобщенном виде результаты численных экспериментов, позволяющих оценить неоднородность σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i во внутреннем объеме зерна и на поверхностях структурных элементов керамики системы Al_2O_3 -MgO, приведены в табл. 1.

Анализ приведенных данных показывает, что напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя керамики системы Al_2O_3 -MgO характеризуется высокой неоднородностью, причем наибольшая неоднородность напряжений зафиксирована во внутреннем объеме зерна. Под действием F средние значения σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i , сформировавшиеся во внутреннем объеме зерна, в 4,6, 5,3, 2,4 и 5 раз превышают аналогичные показатели напряжений, образовавшихся

Таблица 1. Диапазон изменения Σ и средние $\sigma_{ср}$ значения σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i , МПа, в структурных элементах керамики системы Al_2O_3 -MgO под действием разных нагрузок

Нагрузка	σ_{11}		σ_{22}		σ_{12}		σ_i	
	Σ	$\sigma_{ср}$	Σ	$\sigma_{ср}$	Σ	$\sigma_{ср}$	Σ	$\sigma_{ср}$
<i>Внутренний объем зерна</i>								
F	3123	-1384	143	-101	460	503	3132	1634
Q	1652	406	1948	454	689	-244	786	1058
$F + Q$	7222	-3922	6256	-1158	4185	2194	6449	6099
<i>Поверхность зерна, примыкающая к межзеренной фазе</i>								
F	765	-80	324	-113	223	89	188	361
Q	534	-596	704	-93	407	-90	565	617
$F + Q$	899	-492	3445	-98	2386	-294	4281	1106
<i>Поверхность межзеренной фазы, примыкающей к зерну</i>								
F	655	-92	229	-70	181	99	239	303
Q	691	-817	937	-262	846	11	1011	834
$F + Q$	610	-893	5461	-23	1814	54	5220	1178
<i>Поверхность межзеренной фазы, примыкающей к матрице</i>								
F	1463	-38	431	-72	221	78	762	365
Q	2268	-656	798	-274	1166	30	1456	824
$F + Q$	6892	-468	3247	-171	4552	215	9068	1341
<i>Поверхность матрицы, примыкающей к межзеренной фазе</i>								
F	666	-87	242	-57	158	92	299	274
Q	511	-606	780	38	504	-36	758	670
$F + Q$	1013	-639	2648	177	1407	19	2194	966

на поверхностях зерна, межзеренной фазы, примыкающей к зерну и матрице, и матрицы соответственно. Под действием Q средние значения σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i , сформировавшиеся во внутреннем объеме зерна, в 2,6, 1,6, 2,2 и 1,1 раза превышают аналогичные показатели напряжений, образовавшихся на поверхностях зерна, межзеренной фазы, примыкающей к зерну и матрице, и матрицы соответственно. Под действием $F + Q$ средние значения σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i , сформировавшиеся во внутреннем объеме зерна, в 2,2, 1,8, 1,1 и 3,3 раза превышают аналогичные показатели напряжений, образовавшихся на поверхностях зерна, межзеренной фазы, примыкающей к зерну и матрице, и матрицы соответственно.

Наименьшие средние значения σ_{11} , σ_{22} , σ_{12} и σ_i под действием F формируются на поверхности межзеренной фазы, примыкающей к зерну; под действием Q — на поверхности зерна, примыкающей к межзеренной фазе; под действием $F + Q$ — на поверхности матрицы, примыкающей к межзеренной фазе.

При выполнении сравнительного анализа неоднородности напряжений во внутреннем объеме зерна и на поверхностях структурных элементов керамики системы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO}$ и $\text{TiC--MgO--Al}_2\text{O}_3$ (см. работу [18]) под действием разных нагрузок использовали коэффициенты $K_1 = \Sigma_1 / \Sigma_2$ и $K_2 = \sigma_{cp1} / \sigma_{cp2}$, где индексами 1 и 2 обозначены системы $\text{TiC--MgO--Al}_2\text{O}_3$ и $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO}$ соответственно. Результаты сравнительного анализа представлены в табл. 2.

Установлено, что под действием F коэффициенты K_1 и K_2 для внутреннего объема зерна

изменяются в диапазонах 0,99–1,03 и 0,91–1,00 соответственно, что свидетельствует о незначительной разнице Σ и σ_{cp} в двух системах. Под действием Q коэффициенты K_1 и K_2 во внутреннем объеме зерна изменяются в диапазонах 0,09–0,46 и 0,14–0,78 соответственно, под действием $F + Q$ — в диапазонах 0,12–0,47 и 0,22–0,47 соответственно. Видно, что наибольшие значения K_1 и K_2 зафиксированы при воздействии теплового потока, а наименьшие — при воздействии силовой нагрузки.

Последовательно проанализируем значения K_1 и K_2 для поверхностей структурных элементов керамики систем $\text{TiC--MgO--Al}_2\text{O}_3$ и $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO}$.

Для поверхности зерна, примыкающего к межзеренной фазе, K_1 и K_2 изменяются в диапазонах: 0,93–1,09 и 1,0–1,1 соответственно под действием F ; 0,52–0,78 и 0,25–1,06 соответственно под действием Q ; 0,1–0,74 и 0,013–1,45 соответственно под действием $F + Q$.

Для поверхности межзеренной фазы, примыкающей к зерну, K_1 и K_2 изменяются в диапазонах: 0,76–1,36 и 0,77–0,99 соответственно под действием F ; 0,41–0,75 и от 0,98 до –3 соответственно под действием Q ; 0,06–0,67 и 0,07–18,3 соответственно под действием $F + Q$.

Для поверхности межзеренной фазы, примыкающей к матрице, K_1 и K_2 изменяются в диапазонах: 0,8–0,99 и 0,96–1,23 соответственно под действием F ; 0,41–0,75 и от –0,4 до 1,27 соответственно под действием Q ; 0,06–0,14 и 0,31–2,12 соответственно под действием $F + Q$.

Для поверхности матрицы, примыкающей к межзеренной фазе, K_1 и K_2 изменяются в диапа-

Таблица 2. Значения коэффициентов K_1 и K_2 для внутреннего объема зерна и поверхностей структурных элементов керамики систем $\text{TiC--MgO--Al}_2\text{O}_3$ и $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--MgO}$ под действием разных внешних нагрузок

Нагрузка	σ_{11}		σ_{22}		σ_{12}		σ_i	
	K_1	K_2	K_1	K_2	K_1	K_2	K_1	K_2
<i>Внутренний объем зерна</i>								
F	0,99	1	1,03	0,91	0,99	1	0,99	1
Q	0,23	–0,78	0,13	–0,14	0,09	0,47	0,46	0,36
$F + Q$	0,41	0,47	0,12	0,26	0,2	0,22	0,47	0,32
<i>Поверхность зерна, примыкающая к межзеренной фазе</i>								
F	0,93	1,1	0,96	1,01	1,09	1	0,96	1
Q	0,78	1,06	0,52	0,25	0,78	0,84	0,55	1,06
$F + Q$	0,74	1,45	0,16	1,29	0,19	–0,013	0,1	0,64
<i>Поверхность межзеренной фазы, примыкающей к зерну</i>								
F	0,95	0,91	1,36	0,77	1,01	0,95	0,76	0,99
Q	0,7	1,03	0,75	1,39	0,51	–3	0,41	0,98
$F + Q$	0,67	–1,05	0,08	18,3	0,19	1,05	0,06	0,07
<i>Поверхность межзеренной фазы, примыкающей к матрице</i>								
F	0,88	1,23	0,93	1,01	0,99	0,98	0,8	0,96
Q	0,33	1,27	0,91	1,09	0,41	–0,4	0,44	0,99
$F + Q$	0,11	–1,86	0,14	2,12	0,08	0,31	0,06	0,62
<i>Поверхность матрицы, примыкающей к межзеренной фазе</i>								
F	0,95	0,98	0,96	1	1,02	0,94	1,42	0,99
Q	0,88	1,06	0,33	–0,78	0,32	2,41	0,7	0,97
$F + Q$	0,3	1,14	0,17	–0,45	0,15	–0,15	0,17	0,74

зонах: 0,95–1,42 и 0,94–1,00 соответственно под действием F ; 0,32–0,88 и от –0,78 до 2,41 соответственно под действием Q ; 0,15–1,14 и 0,15–0,3 соответственно под действием $F + Q$.

Результаты проведенного анализа показывают, что необходимо учитывать неоднородность напряжений в комбинации систем (все возможные системы, которые формируются основной и упрочняющей фазами) при исследовании напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя оксидно-карбидной керамики. Несмотря на неизменность общих закономерностей влияния внешних нагрузок на неоднородность напряжений во внутреннем объеме зерна и на поверхностях структурных элементов керамики систем $TiC-MgO-Al_2O_3$ и Al_2O_3-MgO , разница в значениях определяющих ее характеристик превышает 10 раз. Это обстоятельство способно оказать важное влияние на определение основных положений модели формирования поверхностного слоя оксидно-карбидной керамики при струйно-абразивной обработке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построенная модель напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя оксидно-карбидной керамики (комбинация систем $TiC-MgO-Al_2O_3$ и Al_2O_3-MgO) при САО позволила выявить влияние силовых, тепловых и комбинированных нагрузок на неоднородность напряжений во внутреннем объеме зерна и на поверхностях структурных элементов керамики этих систем. Установлено, что под действием сосредоточенной силы в керамике разных

систем формируются примерно одинаковые напряжения. Под действием теплового потока и комбинированной нагрузки материал зерна оказывает существенное влияние на значения и неоднородность напряжений во внутреннем объеме зерна и на поверхностях структурных элементов оксидно-карбидной керамики.

Определено, что наибольшие напряжения формируются во внутреннем объеме «выступающих» поверхностных зерен, под действием которых они с высокой степенью вероятности будут разрушаться при САО по транскристаллитному механизму с образованием прямолинейных площадок. Из-за разницы в напряжениях первоначально будут разрушаться поверхностные зерна из оксида алюминия, во вторую очередь — зерна из карбида титана. Высокая неоднородность напряжений на поверхностях структурных элементов оксидно-карбидной керамики определяют большую вероятность зарождения технологических дефектов в виде несплошностей на границах фаз в поверхностном слое керамики. Их рост и последующее образование трещин на границах фаз в результате циклического действия нагрузок, генерируемых при многочисленных контактах абразивных частиц с поверхностью керамики при САО, способны привести к отделению целых зерен или их фрагментов от матрицы в результате действия межкристаллитного механизма разрушения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности.

Библиографический список

1. Кузин, В. В. Влияние воздушно-абразивной обработки на эксплуатационные характеристики изделий из оксидно-карбидной керамики / В. В. Кузин, Н. Р. Портной, С. Ю. Фёдоров [и др.] // Новые огнеупоры. — 2015. — № 9. — С. 62–67.
2. Кузин, В. В. Анализ надежности керамических деталей после гидроабразивной обработки / В. В. Кузин, Н. Р. Портной, С. Ю. Фёдоров [и др.] // Новые огнеупоры. — 2015. — № 11. — С. 63–68.
3. El-Domiaty, A. A. Fracture mechanics-based model of abrasive waterjet cutting for brittle materials / A. A. El-Domiaty, A. A. Abdel-Rahman // Int. J. Adv. Manuf. Technol. — 1997. — Vol. 13. — P. 181–192.
4. Wakuda, M. Material response to particle impact during abrasive jet machining of alumina ceramics / M. Wakuda, Y. Yamauchi, S. Kanzaki // J. Mat. Proces. Technology. — 2003. — Vol. 132. — P. 177–183.
5. Григорьев, С. Н. Морфология поверхности высокоплотной керамики после гидроабразивной обработки / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров [и др.] // Новые огнеупоры. — 2015. — № 3. — С. 123–126.
6. Григорьев, С. Н. Морфология поверхности высокоплотной керамики после гидроабразивной обработки / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров [и др.] // Новые огнеупоры. — 2015. — № 1. — С. 51–56.
7. Grigor'ev, S. N. Model of the formation of the profile of a cut in the hydroabrasive machining of a high-density ceramic / S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 1. — P. 48–53.
8. Chen, L. Optimising abrasive waterjet cutting of ceramic materials / L. Chen, E. Siores, W. C. K. Wong // J. Mat. Proc. Technology. — 1998. — Vol. 74. — P. 251–254.
9. Wang, J. The effect of jet impact angle on the cutting performance in AWJ machining of alumina ceramics / J. Wang // Key Eng. Mater. — 2003. — Vol. 238/239. — P. 117–122.
10. Miranda, R. M. Microstructural study of material removal mechanisms observed in abrasive waterjet cutting of calcareous stones / R. M. Miranda, L. Quintino // Materials Characterization. — 2005. — Vol. 54. — P. 370–377.
11. Wakuda, M. Effect of workpiece properties on machinability in abrasive jet machining of ceramic

- Grigor'ev, V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 2. — P. 164–167.
6. Григорьев, С. Н. Модель формирования профиля реза при гидроабразивной обработке высокоплотной керамики / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров [и др.] // Новые огнеупоры. — 2015. — № 1. — С. 51–56.
- Grigor'ev, S. N. Model of the formation of the profile of a cut in the hydroabrasive machining of a high-density ceramic / S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 56, № 1. — P. 48–53.
7. Chen, L. Optimising abrasive waterjet cutting of ceramic materials / L. Chen, E. Siores, W. C. K. Wong // J. Mat. Proc. Technology. — 1998. — Vol. 74. — P. 251–254.
8. Wang, J. The effect of jet impact angle on the cutting performance in AWJ machining of alumina ceramics / J. Wang // Key Eng. Mater. — 2003. — Vol. 238/239. — P. 117–122.
9. Miranda, R. M. Microstructural study of material removal mechanisms observed in abrasive waterjet cutting of calcareous stones / R. M. Miranda, L. Quintino // Materials Characterization. — 2005. — Vol. 54. — P. 370–377.
10. Wakuda, M. Effect of workpiece properties on machinability in abrasive jet machining of ceramic

- materials / M. Wakuda, Y. Yamauchi, S. Kanzaki // Precision Engineering. — 2002. — Vol. 26. — P. 193–198.
11. **Srinivasu, D. S.** Influence of kinematic operating parameters on kerf geometry in abrasive waterjet machining of silicon carbide ceramics / D. S. Srinivasu, D. A. Axinte, P. H. Shipway [et al.] // Int. J. Machine Tools & Manufacture. — 2009. — Vol. 49. — P. 1077–1088.
12. **Wang, J.** A new model for predicting the depth of cut in abrasive waterjet contouring of alumina ceramics / J. Wang // J. Mat. Proces. Technology. — 2009. — Vol. 209. — P. 2314–2320.
13. **Liu, H.** CFD simulation and mathematical models of the abrasive waterjet characteristics / H. Liu, J. Wang, N. Kelson, R. Brown // J. Mat. Proces. Technol. — 2004. — Vol. 153/154. — P. 488–493.
14. **Saxena, A.** Numerical modelling of kerf geometry in abrasive water jet machining / A. Saxena, S. Paul // Int. J. Abrasive Technology. — 2007. — № 1. — P. 208–230.
15. **Junkar, M.** Finite element analysis of single-particle impact in abrasive water jet machining / M. Junkar, B. Jurisevic, M. Fajdiga [et al.] // Int. J. Impact Engineering. — 2006. — Vol. 32. — P. 1095–1112.
16. **Deam, R. T.** Modelling of the abrasive water jet cutting process / R. T. Deam, E. Lemma, D. H. Ahmed // Wear. — 2004. — Vol. 257. — P. 877–891.
17. **Liu, H.** A study of abrasive waterjet characteristics by CFD simulation / H. Liu, J. Wang, N. Kelson, R. J. Brown // J. Mat. Proces. Technology. — 2004. — Vol. 153/154. — P. 488–493.
18. **Кузин, В. В.** Численное моделирование напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя оксидно-карбидной керамики при струйно-абразивной обработке / В. В. Кузин, Е. Д. Коршунова, Н. Р. Портной [и др.] // Новые огнеупоры. — 2015. — № 12. — С. 51–55.
19. **Кузин, В. В.** Микроструктурная модель керамической режущей пластины / В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2011. — № 5. — С. 72–76.
- Kuzin, V. V.** Microstructural model of ceramic cutting plate / V. V. Kuzin // Russian Engineering Research. — 2011. — Vol. 31, № 5. — P. 479–483.
20. **Григорьев, С. Н.** Автоматизированная система термочисленных расчетов керамических режущих пластин / С. Н. Григорьев, В. И. Мяченков, В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2011. — № 11. — С. 26–31.
- Grigor'ev, S. N.** Automated thermal-strength calculations of ceramic cutting plates / S. N. Grigor'ev, V. I. Myachenkov, V. V. Kuzin // Russian Engineering Research. — 2011. — Vol. 31, № 11. — P. 1060–1066.
21. **Kuzin, V.** Method of investigation of the stress-strain state of surface layer of machine elements from a sintered nonuniform material / V. Kuzin, S. Grigoriev // Applied Mechanics and Materials. — 2014. — Vol. 486. — P. 32–35. ■

Получено 22.01.16

© В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, Н. Р. Портной, 2016 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

June 26 – 30, 2016		Toronto Marriott Downtown Eaton Centre Hotel Toronto, Ontario Canada	
9 th International Conference on High Temperature Ceramic Matrix Composites – HTCMC 9		Global Forum on Advanced Materials and Technologies for Sustainable Development – GFMAT 2016	
HTCMC 9 — 9-я международная конференция по высокотемпературной керамике и композитам		26–30 июня 2016 г. г. Торонто, Канада	
Темы: • Моделирование и конструирование новых материалов и процессов • Проектирование и разработка современных керамических волокон в композитах: симпозиум в честь профессора R. Naslain • Инновационный дизайн, передовые обработки и технологии производства • Материалы для экстремальных условий: сверхвысокотемпературная керамика и наноламинированные тройные карбиды и нитриды (MAX-фазы) • Полимерные производные керамики и композитов • Расширенные тепловые и экологические барьерные покрытия: обработка, свойства и применение • Термомеханическое поведение и производительность композитов • Керамическая интеграция и добавки в технологии производства • Компонент тестирования и оценка композитов • Энергетика в аэрокосмической промышленности: проблемы и возможности			
www.ceramics.org			