

---

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДОСТИ И ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ КВАРЦЕВОЙ КЕРАМИКИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДЕФЕКТНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

**В.А. Рогов, В.В. Копылов,  
М.И. Шкарупа**

Кафедра технологии машиностроения,  
металлорежущих станков и инструментов  
Инженерный факультет  
Российский университет дружбы народов  
*Подольское шоссе, 8/5, Москва, Россия, 113093*

**Е.И. Суздальцев**

ФГУП Обнинское научно-производственное  
предприятие «Технология»  
*Киевское шоссе, 15, Обнинск, Калужской обл., 249035*

Проведены исследования по определению твердости кварцевой стеклокерамики НИАСИТ ( $\text{SiO}_2$ ) при помощи электронного микротвердомера. Приведены трехмерные картины топографии поверхности образцов и профилей по указанным сечениям. Показана зависимость твердости кварцевой керамики от температуры обжига и пористости.

**Ключевые слова:** микротвердость, шероховатость, кварцевая керамика, ситалл, анизотропия, пористость, трещиностойкость, индекс хрупкости.

Широкое применение конструкционной кварцевой керамики и ситаллов в различных областях машиностроения выдвигает в качестве одной из важных проблем повышение конструкционной прочности изделий из этих материалов. Эксплуатационные свойства керамических деталей существенно зависят от условий их механической обработки. Несмотря на то, что исследования в области создания изделий из керамических материалов продолжаются более 50 лет, при механической обработке изделий из ситаллов и кварцевой керамики возникают проблемы, связанные с достижением требуемого уровня их физико-технических свойств.

Наиболее изучено влияние на эксплуатационные свойства деталей из конструкционной керамики показателей шероховатости поверхности, которые являются простым и надежным критерием оценки состояния технологического процесса механической обработки и условий эксплуатации. Шероховатость шлифованных поверхностей керамических деталей определяется свойствами обрабатываемого материала, характеристикой алмазного круга, условиями его правки, режимами шлифования и другими факторами. Изучено влияние режимов резания и характеристики алмазного круга на формирование шероховатости поверхностного слоя изделий из конструкционных неметаллических материалов при шлифовании. Наличие дефектного слоя, возникающего в результате механической обработки, оказывает влияние на снижение прочности и термостойкости ситаллов в 1,5—1,7 раза, конструкционной керамики до 40%. До настоящего времени не сформулированы требования к остаточной обработочной дефектности поверхностного слоя изделий из керамики конструкционного назначения, с учетом структурной дефектности заготовки и эксплуатационных требований к изделиям [4].

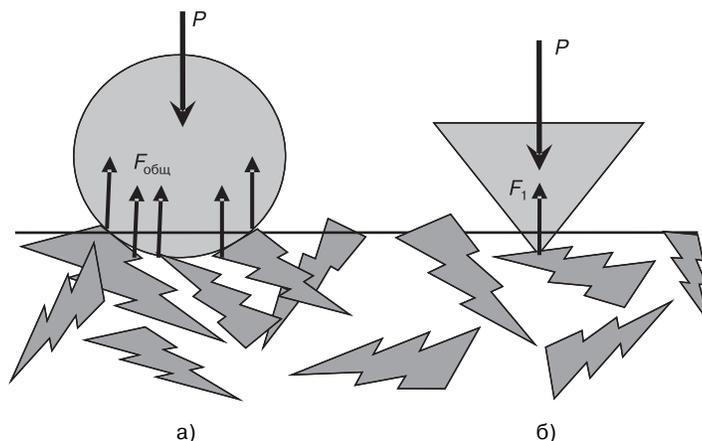
Важной задачей при алмазном шлифовании керамики является выбор характеристики инструмента и режимов резания. В основе выбора параметров процесса обработки лежат знания о физической природе явлений, протекающих при резании, и их влиянии на формирование поверхностного слоя изделий из керамики. Модели формирования поверхностного слоя необходимо строить с учетом физических закономерностей разрушения припуска, имеющих место при обработке керамики, в зависимости от индекса хрупкости обрабатываемого материала  $I = \frac{HV}{K_{1c}}$ , где  $HV$  — твердость по Виккерсу, МПа;  $K_{1c}$  — трещиностойкость, МПа/м<sup>2</sup> и режимов резания ( $V_k$  — скорости круга, м/с,  $V_d$  — скорости заготовки, м/с,  $t$  — глубины алмазного шлифования, мм,  $S$  — подачи круга, мм/об).

Существует несколько различных способов измерения твердости: путем вдавливания пирамиды или сферы, путем царапания, сверления, шлифовки и др. Наиболее точным при определении твердости хрупких материалов является метод определения микротвердости. В то же время число твердости, определяемое по методу вдавливания пирамиды, существенно зависит от нагрузки, при которой проводятся испытания. Поэтому при сравнении чисел твердости различных материалов по методу вдавливания шара (твердость по Бринеллю и Роквеллу), необходимо указывать приложенную нагрузку. Отмечается высокая микротвердость алюмооксидной керамики (18 000—20 000 МПа) значительно превышающая микротвердость серого чугуна (1800—3000 МПа), закаленной инструментальной стали (5500—5800 МПа), кварцевой керамики (5300—5500 МПа) [1].

Ниже приведена твердость по вдавливанию алмазной пирамиды для различных материалов, определенная по вдавливанию алмазной пирамиды под нагрузкой 100 г, МПа. Наблюдаемые отличия в значениях микротвердости вызваны как химическим составом исходных стеклокерамических материалов, так и отличиями основных кристаллических фаз, составляющих материал:

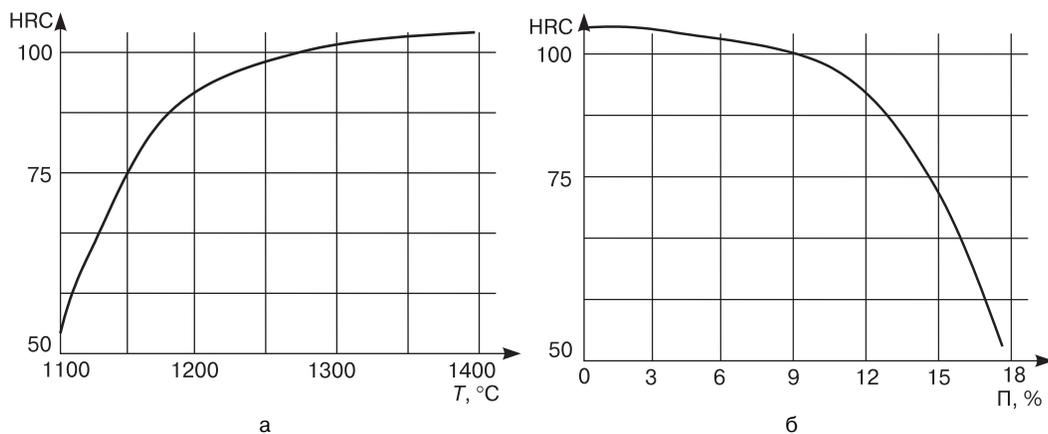
Пирокерам	7 000
Ситалл	9 700
Стеклокерамика ниасит	8 500
Высокоглиноземистая керамика	18 800
Кварцевое стекло	4 800

В то же время определение микротвердости кварцевой керамики не имеет большого смысла, так как либо это будет величиной, аналогичной для кварцевого стекла, когда нагружение пирамидой осуществлено на отдельно взятое зерно, либо микротвердость определить не удастся, если направление усилия пирамиды приводится на границу зерна или в место спекания отдельных зерен (рис. 1). На рисунке видно, что силы, действующие на индентор-шарик суммируются, в отличие от одной силы, возникшей при внедрении в кристаллическое зерно пирамидального индентора (по методу Виккерса). Данное наблюдение свидетельствует о том, что метод определения твердости анизотропной кварцевой керамики путем вдавливания шарика более эффективен, так как показывает именно силу разрушения связей между спеченными частицами материала, а не силу разрушения изотропного кристалла стекла [1].



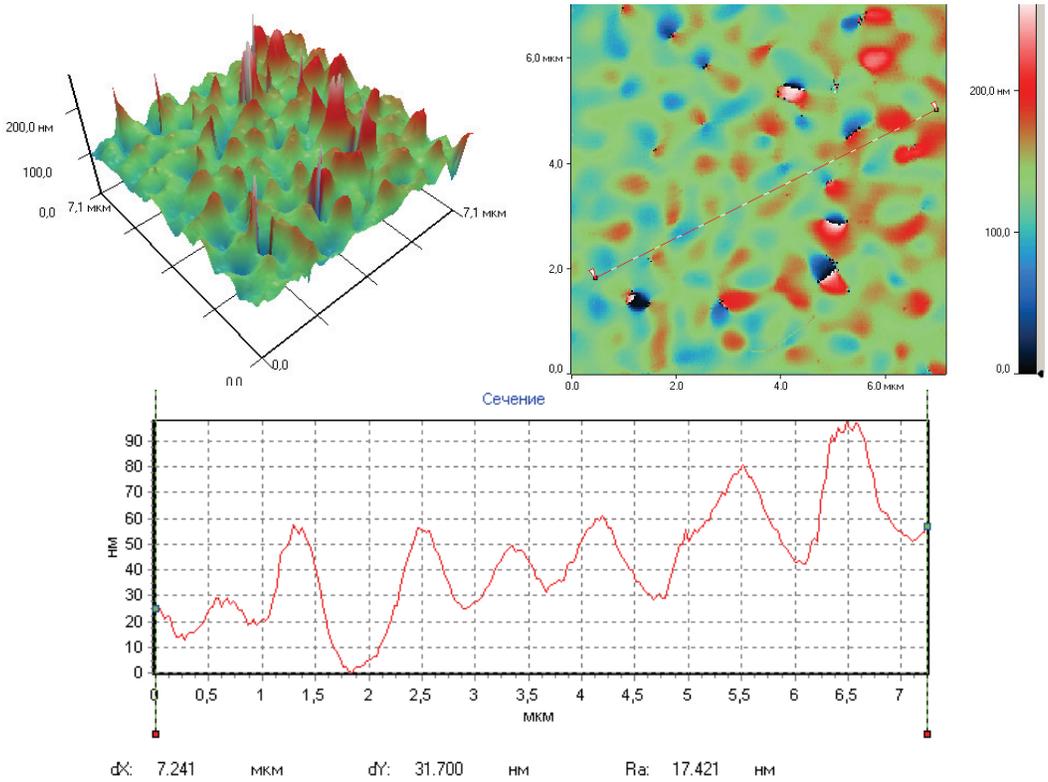
**Рис. 1.** Схемы определения твердости анизотропной кварцевой керамики: а) по Бринеллю и Роквеллу; б) по Виккерсу

Зависимость твердости кварцевой керамики от температуры обжига и пористости, определенная по шкале HRC, представлена на рис. 2. Отмечается однозначная связь между возрастанием значений твердости и степени уплотнения материала при спекании или, что то же самое, с количеством и площадью образовавшихся контактов между отдельными частицами кварцевого стекла, составляющего материал. В области значений пористости кварцевой керамики всех партий, близких к нулевым, независимо от исходного зернового состава и плотности образцов, твердость образцов стремится к максимальному значению 100 ед. по шкале HRC, что соответствует о твердости кварцевого стекла, определенной аналогичным методом [3].

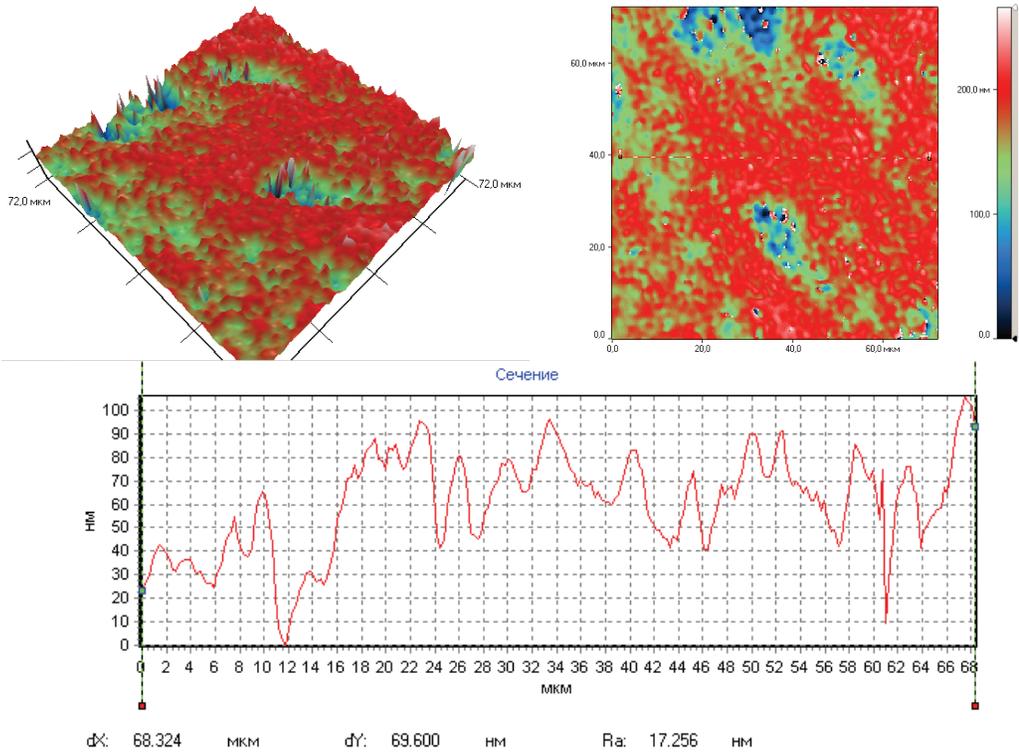


**Рис. 2.** Зависимость твердости кварцевой керамики от температуры а) обжига и б) пористости

Исследование поверхности ниаситовых образцов проводилось методом модуляционной интерференционной микроскопии с нанометровым разрешением по вертикали. Данный метод позволяет получать фазовые портреты микрообъектов, соответствующие геометрическому рельефу, а также определять поляризационные и физические свойства поверхности (показатель преломления, анизотропию, фазовый состав и т.д.) (рис. 3, 4, 5).



**Рис. 3.** Визуализация топографии поверхности отшлифованного образца



**Рис. 4.** Визуализация топографии поверхности отполированного образца

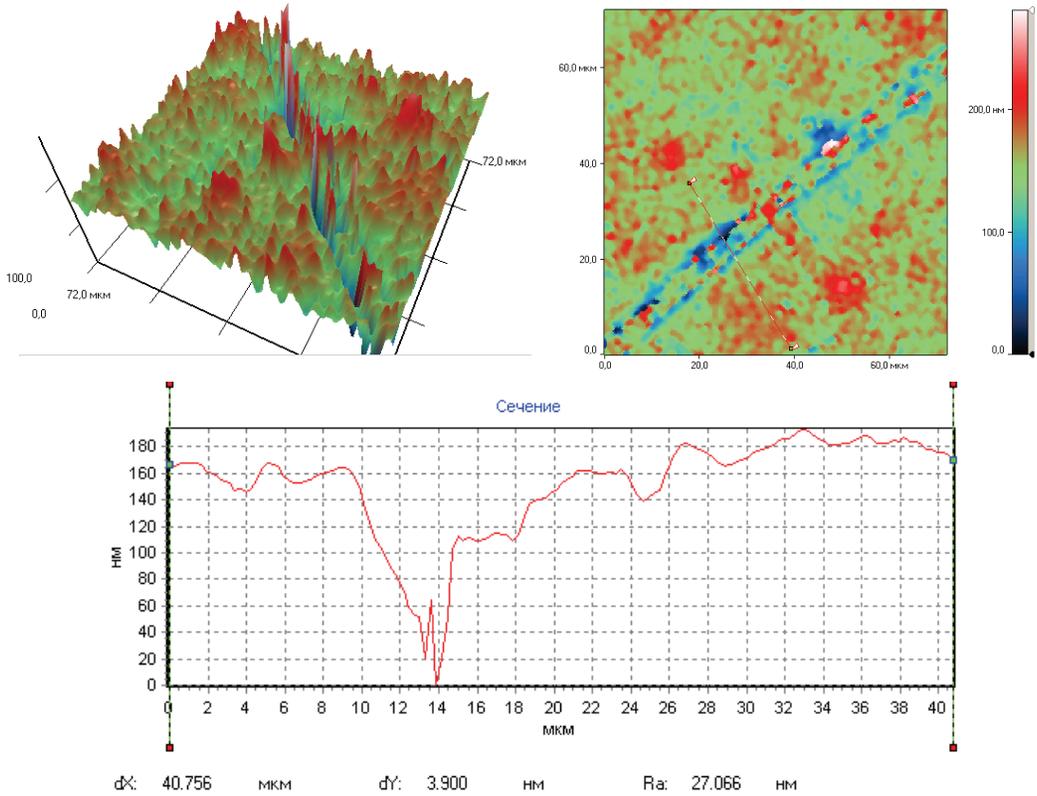


Рис. 5. Визуализация микротрещины на поверхности образца

Поверхностные слои хрупких анизотропных материалов представляют самостоятельную подсистему и определяют многие физико-механические свойства изделий из кварцевой керамики. Целенаправленно изменяя состояние тонких поверхностных слоев, можно управлять свойствами материалов. Эмпирическое уравнение, описывающее процесс диспергирования поверхности изделия, можно представить в виде

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{a_n} \left( \frac{\partial U}{\partial t} - B \frac{\partial \mu}{\partial n} \right),$$

где  $\frac{\partial M}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial U}{\partial t}$  — скорости диспергирования и накопления внутренней энергии;  $a_n$  — удельная работа изнашивания;  $\mu$  — химический потенциал материала;  $n$  — вектор перемещения в направлении максимального градиента химического потенциала;  $B$  — коэффициент энергомассопереноса (аналогично коэффициенту диффузии).

Задачей инженера-технолога является обеспечение комплекса показателей качества поверхностного слоя за счет назначения технологических условий обработки: схемы обработки (ее геометрических и кинематических параметров), характеристик алмазного инструмента и режимов резания. Кроме рационального выбора режимов резания, можно снизить влияние механической обработки

на прочностные свойства образцов за счет снижения размера максимального дефекта обработки.

Из условий формирования дефектов можно считать, что плотности вероятности распределения структурных и обработочных дефектов не зависят друг от друга. Таким образом, общая функциональная зависимость показателей качества изделий из кварцевой конструкционной керамики может быть представлена в виде

$$\Phi_{nc}(K_{1c}, E, HV, \lambda, \mu, R_a, R_{max}, t_p, f(l_c, \alpha_c, l_0, \alpha_0), n_c, n_0, \sigma_n),$$

где  $K_{1c}$ ,  $E$ ,  $HV$  — механические характеристики материала (вязкость разрушения, модуль упругости, микротвердость);  $\lambda$ ,  $\mu$  — физические характеристики материала (коэффициент теплопроводности, коэффициент Пуассона);  $R_a$ ,  $R_{max}$  — параметры шероховатости;  $t_p$  — характеристика опорной поверхности;  $l_0$ ,  $\alpha_0$ ,  $l_c$ ,  $\alpha_c$  — характеристики дефектов обработки поверхности и структуры соответственно;  $n_c$  и  $n_0$  — плотности распределения дефектов на единице поверхности и объема;  $\sigma_n$  — остаточные напряжения в поверхностном слое [5].

Рассматриваемая поверхность формируется методом продольного профильного врезного шлифования алмазным кругом на металлической связке. Допустимые значения среднеарифметического отклонения профиля микронеровностей  $Ra < 2$  мкм.

Структура трещиноватого слоя определяется следующими параметрами: возможной величиной максимальной полудлины дефекта ( $l_{max}$ ), характером распределения дефектов по размерам (параметр трещиноватости  $r$ ), их углом ориентации  $\alpha$  относительно направления приложенной эксплуатационной нагрузки и числом дефектов  $n$  в зоне нагружения. Дефекты структуры зависят от технологического процесса получения заготовки. При увеличении пористости ( $\Pi$ , %) кварцевой керамики  $SiO_2$  размеры структурных дефектов линейно возрастают ( $l_{cmax} = 2,7\Pi + 9,25$ ). Это приводит к линейному снижению трещиностойкости оксидной керамики  $K_{1c} = 2,6 - 0,14 \Pi$  МПа·м<sup>0,5</sup>. Для оболочки двойной кривизны была использована оксидная кварцевая керамика пористости  $\Pi = 2\%$  с индексом хрупкости  $HV/K_{1c} = 4,61$  м<sup>2</sup> и параметром трещиноватости  $r = 8,2$ . Экспериментальные исследования методом индентирования на цифровом микротвердомере HVS-1000 позволили определить величину трещиностойкости образца из кварцевой керамики  $K_{1c} = 1,7$  МПа·м<sup>0,5</sup> [1] (рис. 6).

Исследования проводились при нагрузке 500 г (4,904 Н) и времени выдержки 10 с. Основная сложность заключалась в высокой отражающей способности образцов, из-за чего отпечаток индентора был очень слабо виден. Поэтому поверхность покрывалась тонким слоем пигмента (красилась маркером), и после этого производилось определение микротвердости. Результаты измерений приведены в таблице.

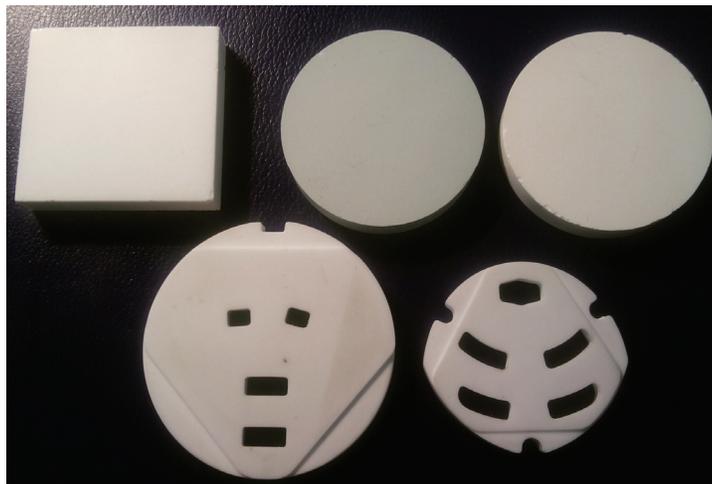


Рис. 6. Исследуемые образцы из ниасита

Таблица

Микротвердость различных образцов ниасита, определенная по вдавлению алмазной призмы под нагрузкой 500 г

Номер измерения	Микротвердость HV, кгс/мм <sup>2</sup>			
	номер образца			
	1	2	3	4
1	582	595	497	583
2	567	582	484	590
3	547	547	487	605
4	558	520	448	555
5	578	604	443	563
Среднее	566,4	569,6	471,8	579,2

Используя полученные зависимости нормальной составляющей силы резания от режимов обработки, можно получить следующие параметры структуры поверхностного слоя с учетом только обработочных дефектов:

$$l_{0\max} = F_1 \cdot (HV / K_{1c}),$$

$$r_0 = A \cdot P_{yH} (V_k, t, V_d, s, HV / K_{1c}) - F_2 (HV / K_{1c}),$$

где  $F_1 \cdot (HV / K_{1c})$ ,  $F_2 \cdot (HV / K_{1c})$  — функции, учитывающие влияние индекса хрупкости обрабатываемого материала на  $l_{\max}$  и  $r$ .

Соотношение полудлины  $l$  и глубины трещины  $h$  (рис. 7), оказывающее влияние на интенсивность напряжений, может быть учтено коэффициентом

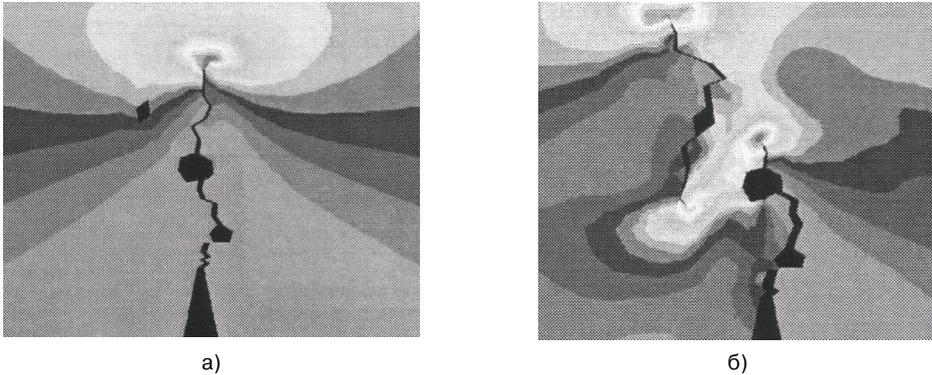
$$k_\phi = \sqrt{1 + 2(l/h)}.$$

Для анализа влияния на высотные параметры микрорельефа керамики параметров режима резания, характеристики алмазного инструмента и свойств об-

работываемого материала необходимо знать зависимости, которые в большинстве случаев представляют в регрессионном виде:

$$Ra = F(HV / K_{1c}, v_k, v_d, t, \bar{d}_3),$$

где  $\bar{d}_3$  — средний размер зерна шлифовального круга.



**Рис. 7.** Траектория распространения структурной микротрещины при одинаковой нагрузке: а) в изотропном материале (ситалл), б) в анизотропном материале (кварцевая керамика)

Предельная нагрузка для изделие из хрупкой кварцевой керамики равна предельной нагрузке наименее прочного из его элементов. Увеличение скорости заготовки и глубины резания приводят к снижению прочности изделий, а повышение скорости круга — к увеличению прочности, что связано с влиянием параметров режима резания на нормальную составляющую силы резания при шлифовании [4].

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пивинский Ю.Е., Суздальцев Е.И. Кварцевая керамика и огнеупоры. Т. 2. — М.: Теплоэнергетик, 2008.
- [2] Воронин С.В., Бунова Г.З., Юшин В.Д. Компьютерное исследование влияния реальной структуры материалов на характер распространения трещин в хрупких анизотропных телах // Проблемы машиностроения и автоматизации. — 2006. — № 4.
- [3] Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. — М.: Металлургия, 1989.
- [4] Гусев В.В. Назначение режимов резания при алмазном шлифовании конструкционной керамики // Вестник науки ДонНТУ. — Донецк, 2006.
- [5] Бахарев В.П. Формирование эксплуатационных характеристик триботехнической керамики методами алмазной доводки. Тезисы докладов международного семинара «Техника и технологии трибологических исследований». — Иваново: Изд. ИВГУ, 2009.

## **THE INVESTIGATION OF QUARTZ CERAMICS SPECIMEN HARDNESS AND ROUGHNESS AS A FUNCTION OF SURFACE IMPERFECTION**

**V.A. Rogov, V.V. Kopylov,  
M.I. Shkarupa**

Department of Mechanical Engineering,  
Machine Tools and Tooling  
Faculty of Engineering  
Peoples' Friendship University of Russia  
*Podolskoe shosse, 8/5, Moscow, Russia, 113093*

**E.I. Suzdaltsev**

FSUE «Obninsk Research and Production Enterprise „Technologiya“»  
*Kievskoe shosse, 15, Obninsk, Kaluga Region 249035*

Studies on the evaluation of quartz glass ceramics NIASIT ( $\text{SiO}_2$ ) hardness with the use of electronic microhardness tester have been conducted. 3D patterns of specimen surface topography and profiles at the specified cross-sections are given. The dependence of quartz ceramics hardness on the burning temperature and porosity is shown.

**Key words:** microhardness, roughness, quartz ceramics, glass ceramics, anisotropy, porosity, crack resistance, index of brittleness.