

Научная статья
УДК 666.3.019
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.014

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА УВЕЛИЧЕНИЯ ВЫХОДА ГОДНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КВАРЦЕВОЙ КЕРАМИКИ

**Алексей Валерьевич Медведев¹, Дмитрий Викторович Харитонов²,
Антонина Александровна Анашкина³, Екатерина Валерьевна Маслова⁴,
Павел Васильевич Коваленко⁵**

^{1–5}АО «ОНПП «Технология» имени А. Г. Ромашина», Обнинск, Россия

¹medvedevav@technologiya.ru

²haritonovdv@technologiya.ru

^{3, 4, 5}info@technologiya.ru

Аннотация

Изложены результаты исследований способа увеличения выхода годных высокотехнологичных крупногабаритных изделий из кварцевой керамики в условиях серийного производства посредством доработки поверхностных дефектов.

Ключевые слова:

кварцевая керамика, поверхностные дефекты керамики, трещины на дефектах

Для цитирования:

Исследование способа увеличения выхода годных изделий из кварцевой керамики / А. В. Медведев [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 2. С. 83–88. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.014.

Original article

RESEARCH OF THE WAY OF INCREASE IN THE EXIT OF EFFECTIVE ARTICLES FROM QUARTZ CERAMICS

**Aleksey V. Medvedev¹, Dmitry V. Kharitonov², Antonina A. Anashkina³,
Ekaterina V. Maslova⁴, Pavel V. Kovalenko⁵**

^{1–5}JSC A. G. Romashin Obninsk Research and Production Enterprise “Technology” (ORPE “Technology”), Obninsk, Russia

¹medvedevav@technologiya.ru

²haritonovdv@technologiya.ru

^{3, 4, 5}info@technologiya.ru

Abstract

The paper presents results of researches of way of increase in exit of effective hi-tech large-size articles from quartz ceramics in the conditions of mass production by means of completion of surface defects are stated.

Keywords:

quartz ceramics, surface defects of ceramics, cracks on defects

For citation:

Research of the way of increase in the exit of effective articles from quartz ceramics / A. V. Medvedev [et al.] // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 2. P. 83–88. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.2.014.

Введение

С середины XX в, кварцевая керамика, благодаря сочетанию уникальных свойств (механическая прочность, термостойкость, температурная стабильность диэлектрических характеристик, теплозащитные функции), находит все более широкое применение в различных областях техники, в том числе в составе высокотехнологичных наукоемких изделий, выполняющих ответственные функции в сложных технических системах. В связи с этим совершенствование технологии получения керамических изделий, направленное на снижение дефектов структуры и поверхностного слоя, является актуальной научно-технической задачей.

В последние годы в связи с увеличением потребности в изделиях из кварцевой керамики перед предприятиями-производителями стоит сложная задача по снижению технологических (производственных) потерь и увеличению выхода годной продукции. Для решения этой задачи проведены комплексные мероприятия по анализу причин появления технологических потерь на всех ключевых стадиях технологического процесса.

Традиционно для получения изделий из кварцевой керамики применяют метод шликерного литья в гипсовые формы. Метод является технологически отработанным и имеет множество преимуществ: применение для изготовления изделий различного назначения и формы; экономический фактор вследствие использования доступных и недорогостоящих материалов для процесса (гипс, вода и небольшой процент химических добавок для стабилизации суспензии) [1]. Несмотря на это, у данного метода имеются и существенные недостатки: низкая производительность вследствие длительности процесса, ограниченный срок службы гипсовых форм (25–40 отливок), неравномерность свойств заготовок как по высоте, так и по объему, флуктуация тепловой энергии в объеме заготовки во время процессов сушки и обжига вызывает локальные усадки, приводящие к возникновению растягивающих напряжений. Указанные факторы являются одними из основных причин появления пор, трещин и других дефектов на этапе структурообразования материала, которые чаще всего обнаруживаются на полностью обработанной керамической детали методом визуально-оптического контроля [2].

Задача снижения количества дефектов керамических изделий достигалась за счет дорогостоящих и длительных экспериментов по совершенствованию технологии на всех этапах изготовления, отработки и внедрения методов неразрушающего контроля. Разработанные и внедренные в настоящее время методы оптимизации технологии получения изделий, в том числе и мероприятия организационного характера, позволили значительно (в несколько раз) увеличить производительность. Таким образом, совершенствование технологии получения изделий из кварцевой керамики подошло к пределу своих возможностей. Для поиска альтернативных путей увеличения выхода годных изделий был проведен анализ брака, выявляемого на различных стадиях технологического процесса, исследовано его влияние на работоспособность изделия и осуществлен поиск возможных путей его устранения.

На операции механической обработки вскрываются все виды брака, заложенные на предыдущих операциях. Виды дефектов, вскрывшиеся на операции механической обработки, представлены в таблице и на диаграмме (рис. 1).

Виды дефектов в процессе изготовления изделий

Вид дефектов	Количество, %
Трещины	50
Трещина по включениям	36
Включение	10
Прочее (кристобалит, отклонение от допуска формы)	4
<i>Итого</i>	100

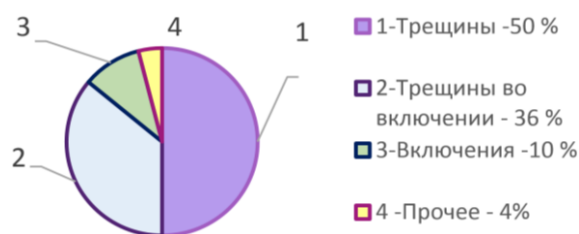


Рис. 1. Дефекты, выявляемые в процессе изготовления изделий

Из представленных данных видно, что среди дефектов керамических изделий наибольшую долю (86 %) составляют трещины (учитывая трещины, определяемые во включениях). При этом многолетний опыт изготовления и испытаний крупногабаритных изделий из кварцевой керамики

показывает, что поверхностные дефекты в виде включений и раковин глубиной, составляющей до 15 % от толщины стенки керамического элемента, не оказывают влияния на прочность изделия и не снижают его надежность.

Было сделано предположение, что возможная доработка места расположения поверхностного дефекта (трещины) или включения путем удаления дефектной области и придания ему правильной сферической формы в виде раковины не окажет критического влияния на прочность изделия.

Цель настоящей работы — оценка влияния на прочность изделий из кварцевой керамики пор (раковин), полученных путем доработки дефектов поверхности в виде трещин и включений, определение размеров исходных дефектов, допускающих возможность устранения доработкой.

Из созданных человеком неорганических материалов при кажущейся на первый взгляд простоте керамика является наиболее сложным материалом как по составу, так и по строению. Как и все керамические материалы, кварцевая керамика формируется вследствие протекания необратимых и неравновесных процессов, поэтому ее структура содержит элементы как упорядоченности, так и хаотичности и в общем случае описывается геометрией фракталов [3; 4].

Известна классификация элементов структуры [5], в которой керамика рассматривается по мере уменьшения масштаба слагающих ее элементов: макро-, микро- или субструктура. Детальное изучение взаимосвязей элементов структуры производится с использованием междисциплинарной методологии «Микромеханика керамики» [6], сущность которой заключается в представлении керамики в виде конструкции, построенной из элементов ее структуры, определении напряженно-деформированного состояния ее структурных элементов под действием внешних нагрузок, а также в использовании результатов численных экспериментов для целевого поиска эффективных методов повышения надежности керамических изделий. Безусловно, применение методологии микромеханики для поиска и оценки способов увеличения выхода годных изделий позволит взглянуть на проблему проектирования, изготовления и эксплуатации работоспособных керамических изделий с системных позиций, однако данные исследования предполагают задействование значительных временных и человеческих ресурсов, что в разрезе сжатых сроков решения поставленной задачи неприемлемо.

Поэтому в данном исследовании рассматриваются только макроструктурные элементы керамики, их взаимодействие в материале и влияние на прочность изделий, так как данный вид элементов наиболее прост в изучении и не требует применения дорогостоящего инструментария.

Под макроструктурами понимаются структурные элементы керамики с размерами более 1 мм. При этом под элементами структуры понимаются твердые тела (зерна, частицы), а под дефектами — границы элементов и пустоты между ними [5]. В данном контексте понятием «дефекты» описываются естественные особенности структуры керамики, которые образуются вследствие технологии ее получения и по которым потенциально пойдет процесс разрушения при воздействии на изделие предельной нагрузки. Реальные керамические изделия всегда содержат дефекты, которые находятся в суб-, микро- и макроструктурах материала. Дефектами макроструктуры являются области с резким изменением плотности (поры, трещины, границы пор и трещин) или нарушения сплошности материала.

Само понятие «дефект» относительно и зависит от того, с какими свойствами материал стоит задача получить. Если цель — получение высокоплотной керамики, то пора для такого материала будет являться дефектом, для пористой керамики пора — это уже элемент ее структуры (в предыдущем абзаце элемент структуры — твердое тело, здесь — пора), выполняющий определенную роль.

Основная задача в таком случае сводится к определению влияния размеров, формы, взаимного расположения дефектов на прочностные свойства керамики в исследуемой области изделия. Чем стабильнее технология получения керамики, тем более равномерно по объему материала распределены дефекты одного размера. В противном случае области с концентрацией дефектов будут иметь более низкую локальную прочность, которая и будет определять прочность всего объема материала.

В общем случае для прочности материала дефекты макроструктуры опаснее дефектов микроструктуры, а последние — субструктуры. Чем крупнее элемент структуры материала, тем больше размеры дефектов, которые могут возникать между ними. Эти дефекты и их количество и будут определять прочность изделия в целом.

План и результаты

В качестве базового изделия было выбрано осесимметричное изделие с диаметром основания 250–350 мм, высотой 500–1 000 мм и толщиной стенки 8–15 мм, которое в процессе эксплуатации подвергается совместному воздействию тепловой и силовой нагрузкам.

Исследования проводились в следующей последовательности:

1. Первоначально выполнен прочностной расчет изделия с наличием дефектов заданных размеров. Результаты расчета показали, что указанные дефекты несущую способность изделия не снижают. Однако расчетная модель предполагала допущение, что раковина в изделии представляет собой лишь локальное изменение объема материала с идеальными бездефектными границами. Выполнить исследование небольшой раковины на предмет наличия на ее границах микротрещин, которые могут являться инициаторами разрушения, имеющимися техническими средствами невозможно. Поэтому данный вопрос решался экспериментально — верификация расчетных результатов проводилась с помощью испытания изделия с нанесенными искусственными дефектами.

2. Перед дорогостоящими испытаниями с реализацией эксплуатационной нагрузки на изделие был проведен менее затратный эксперимент с тестовым нагружением внутренним давлением керамического элемента изделия. По результатам такого испытания подтвердились расчетные выводы — значения давления разрушения бездефектного керамического элемента и керамического элемента с нанесенными раковинами не отличались. При разрушении керамики трещины через нанесенные дефекты не проходили.

3. После получения положительных результатов сравнения расчета и тестового эксперимента проведены зачетные испытания на воздействие эксплуатационного вида нагружения (совместное воздействие тепловой и силовой нагрузки). Их результаты также оказались положительными — стойкость к эксплуатационной нагрузке и определенный после ее воздействия остаточный запас прочности изделия с дефектами не отличались от керамических изделий без дефектов.

Таким образом, экспериментально подтверждено, что доработка любых естественных дефектов на поверхности изделий из кварцевой керамики путем удаления дефектной области материала не приносит в материал микротрещины и не снижает общую несущую способность керамического элемента изделия. Максимальные размеры дефекта, подлежащего доработке, определяются расчетным путем, исходя из размеров изделия и действующих на него в процессе эксплуатации нагрузок.

Керамика в исходном состоянии с нанесенными раковинами сферической формы, фрагменты после разрушения при нагружении внутренним давлением и после определения запаса прочности изделия при испытаниях на стойкость к эксплуатационной нагрузке представлены на рис. 2–4 соответственно.



Рис. 2. Исходное состояние поверхности керамических изделий с нанесенными раковинами сферической формы



Рис. 3. Фрагменты керамических изделий после тестового нагружения внутренним давлением

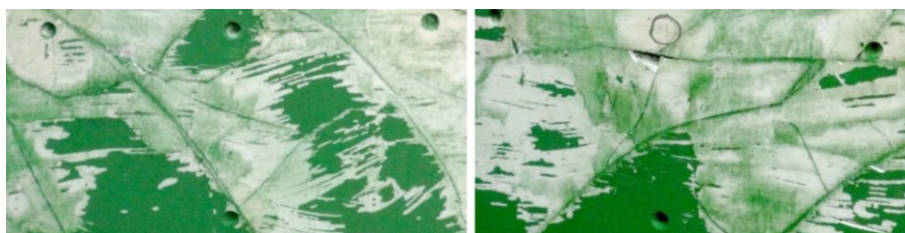


Рис. 4. Фрагменты керамических изделий после испытаний на совместное воздействие теплового нагружения и эксплуатационной силовой нагрузки

Выводы

На примере взятого для эксперимента изделия трещины и трещины во включениях с допустимыми для доработки размерами составляют ~30 % среди всего брака по трещинам. Соответственно, доработка дефектов на изделиях из кварцевой керамики описанным методом позволяет значительно (до 30 %) увеличить выход годной продукции без увеличения производственных площадей и с минимальными дополнительными временными затратами.

Результаты исследований не являются окончательными и требуют дальнейшей проработки для формирования общих принципов устранения дефектов изделий из кварцевой керамики, определения предельных размеров дефектов, возможных для доработки рассмотренным способом в зависимости от размеров изделия, а также исследования возможности применения данного метода для изделий из других видов технических керамик.

Список источников

1. Конкина К. А., Маслова Е. В., Перкин Ю. А. Анализ методов формования толстостенных заготовок из шликеров кварцевой керамики (обзор) // Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр. Т. XXXVII. № 5 (267). М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2023. 192 с.
2. Харитонов Д. В., Терехин А. В., Русин М. Ю., Анашкина А. А., Тычинская М. С., Амосов А. И., Маслова Е. В., Типикин М. Е. Разработка методики визуально-оптического контроля изделий из кварцевой керамики // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2021. № 4.
3. Салахов А. М., Салахова Р. А., Ильичева О. М., Морозов В. П., Хацринов А. И., Неведьев Е. С. Влияние структуры материалов на свойства керамики // Вестник Казанского технологического университета. 2010.
4. Оксидная керамика и огнеупоры // Спекание и ползучесть: учеб. пособие по курсу «Химическая технология тугоплавких неметаллических и силикатных материалов» / /В. С. Бакунов, А. В. Беляков, Е. С. Лукин, У. С. Шаяхметов; под ред. В. С. Бакунова. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2007. 584 с.
5. Бакунов В. С., Беляков А. В. К вопросу об анализе структуры керамики // Неорганические материалы. 1996. Т. 32, № 2. С. 243–248.
6. Кузин В. В., Григорьев С. Н., Аникин В. Н. Введение в микромеханику керамики. Система эксплуатации керамических изделий // Новые огнеупоры. 2019. № 2.

References

1. Konkina K. A., Maslova E. V., Perkin Ju. A. Analiz metodov formovaniya tolstostennykh zagotovok iz shlikerov kvarcevoj keramiki (obzor) [The analysis of methods of formation of thick-walled preparations from slip of quartz ceramics (review)]. *Uspehi v himii i himicheskoy tehnologii* [Achievements in chemistry and chemical engineering]. Vol XXXVII, No. 5 (267). Moscow, RHTU im. D. I. Mendeleeva, 2023, 192 p. (In Russ.).
2. Haritonov D. V., Terehin A. V., Rusin M. Ju., Anashkina A. A., Tychinskaja M. S., Amosov A. I., Maslova E. V., Tipikin M. E. Razrabotka metodiki vizual'no-opticheskogo kontrolja izdelij iz kvarcevoj keramiki [Development of technique of visual and optical control of products from quartz ceramics]. *Oboronnyj kompleks — nauchno-tehnicheskomu progressu Rossii* [Defense industry — to scientific and technical progress of Russia], 2021, No. 4. (In Russ.).
3. Salahov A. M., Salahova R. A., Il'icheva O. M., Morozov V. P., Hacrinov A. I., Nefed'ev E. S. Vlijanie struktury materialov na svojstva keramiki [Influence of structure of materials on properties of ceramics]. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan technological university], 2010. (In Russ.).

4. Bakunov V. S. Oksidnaja keramika i ognepory. Spekanie i polzuchest' [Oxidic ceramics and refractory materials. Agglomeration and creep]. *Himicheskaja tehnologija tugoplavkih nemetallicheskih i silikatnyh materialov* [Chemical engineering of high-melting non-metallic and silicate materials]. Moscow, RHTU im. D. I. Mendeleeva, 2007, 584 p. (In Russ.).
5. Bakunov V. S., Beljakov A. V. K voprosu ob analize struktury keramiki [To question of the analysis of structure of ceramics]. *Neorganicheskie materialy* [Inorganic materials], 1996, Vol 32, No. 2, pp. 243–248. (In Russ.).
6. Kuzin V. V., Grigor'ev S. N., Anikin V. N. Vvedenie v mikromehaniku keramiki. Sistema jekspluatacii keramicheskikh izdelij [Introduction to ceramics micromechanics. System of operation of pottery work]. *Novye ognepory* [New refractory materials], 2019, No. 2. (In Russ.).

Информация об авторах

А. В. Медведев — ведущий инженер-конструктор;

Д. В. Харитонов — доктор технических наук, доцент, заместитель директора научно-производственного комплекса по производственной деятельности — начальник цеха;

А. А. Анашкина — кандидат технических наук, начальник лаборатории;

Е. В. Маслова — кандидат технических наук, руководитель группы;

П. В. Коваленко — кандидат технических наук, ведущий специалист.

Information about the authors

A. V. Medvedev — Leading Design Engineer;

D. V. Kharitonov — DSc (Engineering), Associate professor, Deputy Director of Scientific and Production Complex for Production — Head of Workshop;

A. A. Anashkina — PhD (Engineering), Head of Laboratory;

E. V. Maslova — PhD (Engineering), Head of Group;

P. V. Kovalenko — PhD (Engineering), Leading Expert.

Статья поступила в редакцию 02.06.2025; одобрена после рецензирования 23.06.2025; принята к публикации 07.07.2025.

The article was submitted 02.06.2025; approved after reviewing 23.06.2025; accepted for publication 07.07.2025.