

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ ПОРИСТОГО КЕРАМИЧЕСКОГО ИЗДЕЛИЯ

**А. И. Захаров, Д. В. Андреев, Ж. В. Андреева,
РХТУ им. Д. И. Менделеева, Москва;**

**Т. Л. Неклюдова, ООО «Керамика Гжели», Московской обл.,
Раменский район, пос. Комбината стройматериалов-2**

Ключевые слова: пористая керамика, оптимизация формы, фактор формы

Key words: porous ceramics, shape optimization, form factor

Керамику производят и используют в виде отдельных модулей, деталей и отдельных изделий. В зависимости от применения форма изделий диктуется соображениями техники, эргономики, эстетики. Так же большое влияние на нее оказывают возможности технологии (прежде всего, формования, сушки, обжига). Сложность формы керамического изделия определяется в основном проблемами (дороговизной) производства. В конечном итоге достигается компромисс между функциональностью формы изделия и ее технологичностью (минимальными затратами при производстве) [1].

Цель настоящей статьи – на примере изделий из пористой керамики, используемой в качестве адсорбирующего материала, показать возможность оптимизации формы изделий, исходя из критериев, описывающих как условия их эксплуатации, так и производства.

Пористая керамика находит применение в качестве материалов для теплоизоляции, звукоизоляции, фильтров, адсорбентов. Высокая пористость, создаваемая с помощью различных технологических приемов, обеспечивает уникальные свойства таких изделий (высокую проницаемость газовых или жидких сред, поглощаемость тепловых потоков или звуковых колебаний и т. д.). Регулировка свойств обеспечивается созданием определенной поровой структуры материала [2]. В работе описан метод оптимизации формы изделия, используемый для временного хранения поглощенной жидкости.

Основой для разрабатываемых изделий служила масса на основе пластичной легкоплавкой глины. Для создания высокой пористости (свыше 70%) в данной работе использовали метод выгорающих добавок [3], в качестве которых применяли органические отходы производств. Глину с отходами увлажняли и смешивали в шнековом смесителе, после чего формовали образцы. Образцы сушили при 100 °С до постоянной массы и обжигали в воздушной среде при температуре 900 °С в течение времени, достаточного для получения прочного изделия.

К изделиям предъявляли следующие требования: высокая скорость впитывания и объем поглощенной жидкости (не менее 100% по массе). Образцы погружали в емкость с жидкостью и извлекали из нее как ручным, так и автоматизированным способами. В техническое задание данной работы в качестве значимых параметров не входили ни габариты образцов, ни их форма, поэтому, помимо разработки материала с определенными характеристиками (пористость, прочность, способность к впитыванию жидкости), стояла задача оптимизировать форму изделия.

При проектировании изделия учитывали следующие факторы:

габариты изделия должны обеспечивать значительный объем впитывания;

максимальное время насыщения образца жидкостью не должно превышать 10 мин, что определяет сроки загрузки емкости, окончание которой совпадает с началом ее разгрузки.

Для удобства ручной загрузки и выгрузки максимальный объем, впитанной изделием жидкости ограничивается 1 л. При выполнении этого условия при плотности материала, не превышающей 500 кг/м³, общая масса изделия не будет превышать 1,5 кг, что позволяет легко извлекать насыщенное изделие одной рукой [4]. Скорость впитывания воды материалом, определенная опытным путем, составила 0,0018 г/мм² мин. Исходя из определенной скорости впитывания, для насыщения образцов 1,0 л жидкости в течение 10 мин, площадь образца должна составлять не менее 55 000 мм².

Таким образом, были определены граничные параметры изделия (максимальный объем и минимальная площадь). Форму изделия определяли исходя из следующих предпосылок:

изделие должно иметь эргономичную форму, т. е. быть удобным для перемещения, хранения и использования ручным способом;

изделие должно быть технологично, т. е. удобно для изготовления.

Форма изделия во многом определяет его технологию (способ формования, режимы сушки и обжига). Анализ научной и технической литературы показал, что сложными изделиями для производства считают керамические изделия, имеющие форму тела сложной конфигурации или крупных габаритов, требующие особых режимов формования, сушки и обжига [5].

При выборе способа формования изделий определенной формы учитывают возможность получения заготовки однородной бездефектной структуры. Среди параметров формы изделия, оказывающих наибольшее влияние на образование дефектов при формовании, указываются объем изделия, его габариты, площадь сечения в направлении формования, высота в направлении формования. При интенсивных усилиях, прилагаемых к формируемой массе (прессование, экструзия), преимущественное значение имеют параметры, характеризующие влияние краев изделия, образуемых стенками

формы и формирующего инструмента. Повышенное трение частиц массы о поверхности формирующей оснастки (внешнее трение) приводит к образованию сдвиговых напряжений в поперечном сечении формируемой массы, которые могут фиксироваться в виде мест повышенной пористости, свиелей и микротрещин заготовки. Так, для прессуемых изделий критической характеристикой изделия является отношение высоты прессовки к ее гидравлическому радиусу (отношению удвоенной площади поперечного сечения к его периметру) [6, 7], поэтому при полусухом прессовании или пластическом формовании в закрытую форму для получения однородного изделия необходимо стремиться к увеличению площади его поперечного сечения без усложнения его профиля.

Структура материала во многом также определяется способом формования. Применение способа прессования различных видов приводит к образованию более плотных структур с менее проницаемыми порами [8]. В нашем случае более пористую структуру легче получить формованием пластичной массы с повышенным содержанием временной технологической связки под небольшими усилиями, поэтому предпочтительнее формировать изделие из пластичных масс способами экструзии, набивки, штамповки. При этом желательно обеспечить большую площадь сечения изделия в направлении формования.

При сушке и обжиге формованного полуфабриката происходят значительные объемные изменения, связанные с усадкой. Для сохранения целостности изделия необходимо учитывать габариты изделия, прежде всего, его толщину, определяющую максимальные скорости нагрева и охлаждения [9, 10]. Эта характеристика тем более важна для материалов с низкой теплопроводностью, к которым относится пористая керамика.

В работах [5, 11] в качестве основных критериев оценки сложности формы, т. е. удобства ее производства (технологичности) были предложены фактор формы (отношение объема к поверхности), габариты изделия и симметрия, соответствующая симметрии формирующих усилий. Поясним данные положения относительно поставленной задачи.

Фактор формы изделия трактуется, как отношение его объема к поверхности. Фактически фактор формы показывает толщину изделия, преобразованного в пластину из тела любой конфигурации. Толщина такой пластины подобна приведенной толщине изделия или его характерному размеру, используемых в теплотехнических расчетах (нагрев, охлаждение и испарение влаги через открытые поверхности изделия) [12]. Рассматривая процесс формования, необходимо учитывать направление формования, т. е. использовать приведенный фактор формы, учитывающий площадь, на которую распределяются усилия формования.

Габариты изделия в значительной степени определяют и удобство производства (формования, транспортировки на передель технологии, садки и т. д.), и вероятность образования дефектов. Увеличение габаритов изделия той же формы увеличивает фактор формы. Наиболее эргономичными габаритами изделий, несмотря на повсеместную автоматизацию производства, по-прежнему, являются габариты, соизмеримые с параметрами рук человека. Изготовление слишком больших или слишком маленьких по сравнению с габаритом рук изделий означают разработку специальных, нетипичных видов оборудования и оснастки. В нашем случае удобство обращения с изделием (складирование, загрузка, выгрузка) можно определить, как удобство захвата изделия рукой. Следовательно, толщина образца в одном измерении не должна превышать 120 мм, оптимальная – 80 мм [13].

Наличие симметрии в форме изделия облегчает процесс укладки частиц формовочной массы в форму, при прочих равных условиях облегчает равномерное распределение формовочных усилий по объему формируемой заготовки, а также, при равных условиях тепло- и влагообмена, обеспечивает более равномерное протекание усадки в разных частях изделия при сушке и обжиге по сравнению с изделиями несимметричной формы. Наиболее распространены изделия, обладающие осевой симметрией (диски, цилиндры, втулки), форма которых позволяет достичь равномерности возникающих напряжений относительно центра заготовки. При этом симметрия формирующих усилий, симметрия температурно-влажностных полей (сушка) и симметрия температурных полей (обжиг) должна соответствовать симметрии формы изделия.

В табл. 1 перечислены параметры формы изделия, оптимальные для различных стадий его изготовления (технологичности), а также для службы изделия (функциональности) [14]. Из табл. 1 видно, что в процессах изготовления изделия из пористой керамики и его эксплуатации наиболее значимым параметром является толщина, за которую можно принять размер изделия в направлении действия сил формования, подвода и отвода тепла, удаления и впитывания жидкости. За толщину изделия, участвующего в этих процессах, можно принять его фактор формы, величина которого, в отличие от объема и поверхности изделия, имеет оптимальную область значений. Так, при формовании уменьшение объема заготовки облегчает ее формование, однако увеличение ее поверхности означает возрастание сил внешнего трения, что может привести к нарушению однородности.

В нашем случае для формования изделий были выбраны две разновидности пластического формования: набивка и протяжка (экструзия). Способом набивки изготовили изделия в виде цилиндра, усеченного конуса и пирамиды (рис. 1), размеры которых были достаточны для обеспечения быстрого всасывания жидкости. Изделие в виде усеченного конуса обладало большой поверхностью, однако имело небольшой объем.

Параметры формы изделия пористой керамики, значимые для процессов технологии и эксплуатации

Стадия изготовления и службы	Процессы	Критерии подобия, описывающие процессы	Требования к геометрическим параметрам изделия		
			Объем	Поверхность	Фактор формы
Формование	Быстрое уплотнение с минимальным влиянием внешнего трения	Критерий Ньютона $Ne = F \cdot t^2 / m \cdot l$ Критерий Пуассона $E/E \cdot l^2$	Минимум	Оптимум	Оптимум
Сушка	Быстрый нагрев, испарение влаги	Критерий Био $Bi = \alpha \cdot l / \lambda$	Минимум	Максимум	Минимум
Обжиг	Быстрый нагрев и охлаждение	Радиационный критерий Био $Bi_{рад} = \sigma_0 \cdot T_0^3 \cdot l / \lambda$	Минимум	Максимум	Минимум
Служба	Быстрое капиллярное всасывание максимально возможного объема жидкости	Диффузионный критерий Био $Bi = \beta l / k$	Максимум	Максимум	Оптимум

Примечание. Обозначения в формулах: F – сила, t, T – время, m – масса, E – модуль упругости, α , λ , β , k – коэффициенты теплоотдачи, теплопроводности, массоотдачи, массопроводности соответственно, σ – постоянная Больцмана, l – характерный размер тела.

Пояснения: минимум – желательное уменьшение параметра, максимум – желательное увеличение параметра, оптимум – существует область оптимальных значений для конкретных условий.

Для экструзии, как производственного способа формования, был использован мундштук с диаметром 155 мм (рис. 2). Первоначально выбранные параметры изделий (диаметр 155 мм, высота 180 мм) были изменены в сторону снижения фактора формы из-за большой длительности сушки и обжига. Изделия долго не высыхали и в обжиге не достигали полного выгорания органической добавки (образовывался дефект «черная сердцевина»). Для облегчения изготовления изделий их форма была изменена с цилиндра на втулку с центральным отверстием. Наличие отверстия существенно снизило фактор формы и дало возможность значительно облегчить удаление влаги при сушке и гораздо быстрее прогреть и охладить изделие при обжиге. В целом после оптимизации формы изделия общее время сушки и обжига сократилось в 1,5 раза.



Рис. 1. Изделия, выполненные методом набивки:
1) цилиндр; 2) конус диаметром 135 мм с отверстием;
3) усеченная пирамида; 4) усеченный конус с отверстием



Рис. 2. Изделия, изготовленные методом экструзии

Габариты изделия были определены по сформулированным ранее требованиям к высоте, объему и площади с учетом технологической коррекции формы (табл. 2).

Таблица 2

Выбранные параметры для изготовления изделий

Форма изделия	Диаметр, мм	Высота, мм	Объем, л	Площадь поверхности, мм ²	Фактор формы, мм
Цилиндр	155	180	3,4	106465	32
Втулка	135	60	0,8	58000	14
Усеченная пирамида с отверстием	95	90	0,5	39050	13
Усеченный конус с отверстием	50	100	0,7	22110	31
Втулка	155	60	1,0	71945	15

После выбора формы проводили коррекцию высоты изделия, уменьшение которой также приводило к уменьшению фактора формы и, следовательно, к облегчению сушки и обжига (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Коррекция высоты изделий, подбор оптимального фактора формы

Высота изделия, мм	Параметры изделия в форме цилиндра диаметром 155 мм			Параметры изделия в форме втулки диаметром 155 мм с отверстием диаметром 40 мм		
	Объем жидкости, мл	Время насыщения, мин	Фактор формы изделия, мм	Объем жидкости, мм ³	Время насыщения, мин	Фактор формы изделия, мм
180	1700	9	32	1600	7	22
120	1200	8,5	29	1000	6	21
80	700	7	26	700	6	19
60	500	6	24	500	5	17

Из данных, приведенных в табл. 2 и 3, видно, что сформулированным ранее условиям в большей степени соответствует изделие – втулка с объемом 1 л, поглощающее 0,5 л жидкости за 5 мин.

В результате проведенной работы была оптимизирована форма изделия из пористой керамики для эксплуатации и производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технологичность конструкции изделия: Справочник / Ю. Д. Амиров, Т. К. Алферова, П. Н. Волков и др. Под общ. ред. Ю. Д. Амирова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 768 с.
2. Огнеупорные материалы. Структура, свойства, испытания: справочник / пер. с нем.; под ред. Г. Роучка и Х. Вутнау. – М.: Интернет Инжиниринг, 2010. – 302 с.
3. Пищ И. В. Свойства керамических стеновых материалов при введении различных выгорающих компонентов // Стекло и керамика. – 2015. – № 2. – С. 19–23.
4. Основы эргономики: человек, пространство, интерьер: справочник по проектным нормам / пер. с англ.; под ред. Джулиус Панеро, Мартин Зелник. – М.: Астрель, 2008. – 319 с.
5. Захаров А. И., Кухта М. С. Форма керамических изделий. Философия // Дизайн. Технология. – Томск: СТТ, 2015. – 224 с..
6. Попильский Р. Я., Пивинский Ю. Е. Прессование порошковых керамических материалов. – М.: Металлургия, 1983. – 176 с.
7. Тимохова М. И. Основные способы оформления технической керамики методом прессования // Стекло и керамика. – 2001. – № 11. – С. 20–23.
8. Лотов В. А. Контроль процесса формирования структур в технологии керамических и силикатных материалов // Стекло и керамика. – 1999. – № 5. – С. 21–24.
9. Чижский А. Ф. Сушка керамических материалов и изделий. – М: Стройиздат, 1971. – 176. с.
10. Кунавин М. М. Методика расчета режима обжига термически массивных изделий из керамики // Стекло и керамика. – 1996. – № 9. – С. 16–19.
11. Захаров А. И. Формообразование керамических изделий: принцип П. Кюри и тенденции развития // Труды Академии технической эстетики и дизайна. – 2014. – № 3. – С. 9–15.
12. Стрелов К. К., Мамыкин П. С. Технология огнеупоров. – М.: Металлургия, 1978. – 376 с.
13. Эргономика в упаковке [Электронный ресурс]. URL: <http://eqinfo.ru/blog/details?newsId=24> (дата обращения 21.06.2017).
14. Основные критерии подобия химико-технологических процессов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/2/3429.html> (дата обращения 21.06.2017).

REFERENCES

1. Amirov Yu. D., Alferova T. K., Volkov P. N., et al. *Tehnologichnost' konstrukcii izdelija: Spravochnik* [Technological design of the product]. Ed. by Yu. D. Amarov. 2nd Publ., revis. and enlarg., Moscow: Mashinostroenie, 1990, 768 p (in Russian).
2. *Ogneupornye materialy. Struktura, svojstva, ispytaniya: spravochnik* [Refractory materials. Structure, properties, tests: reference book]. Pod red. G. Rouchka i H. Vutnau. Moscow: Internet Enginiring, 2010, 302 p (in Russian).
3. Pishch I. V. Svojstva keramicheskikh stenovykh materialov pri vvedenii razlichnykh vygorayushhikh komponentov [Properties of ceramic wall materials with the introduction of various burnout components]. *Steklo i keramika*, 2015, no. 2, pp. 19–23 (in Russian).
4. *Osnovy jergonomiki: chelovek, prostranstvo, inter'er: spravochnik po proektnym normam* [The basics of ergonomics: man, space, interior design: Handbook of design rules]. Ed. by Julius Panero, Martin Zelnik, Moscow: Astrel', 2008, 319 p (in Russian).

5. Zakharov A. I., Kukhta M. S. *Forma keramicheskikh izdelij. Filosofiya* [The form of ceramic products. Philosophy]. *Dizajn. Tekhnologiya*. Tomsk: STT, 2015, 224 p (in Russian).
6. Popil'sky R. Ya., Pivinsky Yu. E. *Pressovanie poroshkovykh keramicheskikh materialov* [Pressing powdered ceramic materials]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 176 p (in Russian).
7. Timokhova M. I. Osnovnye sposoby oformleniya tekhnicheskoy keramiki metodom pressovaniya [The main ways to design technical ceramics by pressing]. *Steklo i keramika*, 2001, no. 11, pp. 20–23 (in Russian).
8. Lotov V. A. Kontrol' processa formirovaniya struktur v tekhnologii keramicheskikh i silikatnykh materialov [Control of the process of formation of structures in the technology of ceramic and silicate materials]. *Steklo i keramika*, 1999, no. 5, pp. 21–24. (in Russian).
9. Chizhsky A. F. *Sushka keramicheskikh materialov i izdeliy* [Drying of ceramic materials and products]. Moscow: Stroyizdat, 1971, 176 p (in Russian).
10. Kunavin M. M. Metodika rascheta rezhima obzhiga termicheski massivnykh izdeliy iz keramiki [The method of calculation of firing the thermally massive ceramics]. *Steklo i keramika*, 1996, no. 9, pp. 16–19 (in Russian).
11. Zakharov A. I. Formoobrazovanie keramicheskikh izdeliy: princip P. Kyuri i tendencii razvitiya [Formation of ceramic products: the principle of P. Curie and the development trend]. *Trudy Akademii tekhnicheskoy estetiki i dizayna*, 2014, no. 3, pp. 9–15 (in Russian).
12. Strelov K. K., Mamykin P. S. *Tekhnologiya ogneporov* [Refractory technology]. Moscow: Metallurgiya, 1978, 376 p (in Russian).
13. *Ergonomika v upakovke* [Ergonomics in packaging] [Electronic resource]. URL: <http://eqinfo.ru/blog/details?newsId=24> (accessed 21.06.2017) (in Russian).
14. *Osnovnye kriterii podobiya khimiko-tekhnologicheskikh processov* [The main criteria for the similarity of chemical-technological processes] [Electronic resource]. URL: <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/2/3429.html> (accessed 21.06.2017) (in Russian).

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КРЕМНИЯ С ХИМИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ, ОБРАЗУЮЩИМИ С НИМ БИНАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Н. В. Молчан, НПЦ «Фармзащита», Московская обл., г. Химки;

Ю. Р. Кривобородов, РХТУ им. Д. И. Менделеева, Москва;

В. И. Фертиков, Всероссийский институт легких сплавов, Москва

Ключевые слова: концентрация электронов, плотность, энтальпия, кремний, структура соединений
Keywords: concentration of electrons, density, enthalpy, silicon, structure of compounds

Химические превращения сопровождаются тепловыми процессами и изменениями объема веществ, вступающих в реакцию. Основное уравнение термодинамики в виде

$$dU = TdS - pdV \quad (1)$$

подразумевает, что изменение внутренней энергии системы идет за счет тепловой энергии при изменении объема dV . Тепловые процессы достаточно подробно рассмотрены в многочисленных работах по химической термодинамике и термохимии, как экспериментальных, так и с применением расчетных методов, а данных по изменению объемов при химических реакциях практически нет.

В работах по сульфидам и оксидам [1, 2] было установлено, что нормированная величина изменения объемов (коэффициент уплотнения) коррелирует с термодинамическими характеристиками.

Так как объем молекулы формируется электронами, то вводится величина «концентрация электронов», которая может применяться в качестве структурной характеристики вещества. Изменение структуры вещества без изменения химического состава всегда сопровождается изменением взаимодействия электронов в веществе (фазовые превращения) [3, 4]. Превращения веществ и сопровождающие их явления – сущность химической формы движения, которая определяется взаимодействием электронных оболочек атомов и молекул [5].

Цель данной работы – выявить возможность использования коэффициента уплотнения как характеристики, позволяющей оценивать интенсивность взаимодействия между разнородными атомами, а концентрацию электронов (определяемую в единицах моль/см³) применять в качестве величины, которая дает разрешение на оценку структуры материала. Указанная цель достигалась путем выявления различия в объемах веществ до образования соединения и после на примере ряда бинарных соединений кремния.

Приведенные ниже вычисления построены на основании справочных данных по плотности веществ в конденсированном состоянии [6–8]. Величина атомного объема (объем одного моля атомов химического элемента, см³/моль) характеризует относительную рыхлость электронных оболочек, а величина обратная атомному объему (моль/см³) представляет собой концентрацию ядер атомов в единице объема: