

**СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ  
ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ КВАЗИИЗОСТАТИЧЕСКИМ ПРЕССОВАНИЕМ**

Я.О. Иващенко, Т.Р. Алишин

Научный руководитель: др. физ.-мат. наук Э.С. Двилис

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 2, 634028

E-mail: [yanaiwashchenko16@gmail.com](mailto:yanaiwashchenko16@gmail.com)

**COMPARATIVE STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF CERAMICS BASED ON  
ZIRCONIUM DIOXIDE PRODUCED BY QUASI-STATIC PRESSING**

Y.O. Ivashchenko, T.R. Alishin

Scientific Supervisor: Dr. Phys.-Mat. Sciences E.S. Dvilis

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 2, 634028

E-mail: [yanaiwashchenko16@gmail.com](mailto:yanaiwashchenko16@gmail.com)

***Abstract.** This work is devoted to comparing the mechanical characteristics of ceramics made by quasi-static pressing and uniaxial one-sided pressing in closed rigid molds.*

**Введение.** Технологии, позволяющие изготавливать керамические изделия сложной формы с использованием жестких пресс-форм, востребованы во многих областях науки и техники. Особенно актуально использование таких технологий в медицине для производства протезов и имплантатов различного назначения. Одной из основных проблем, ограничивающих применение методов прессования в закрытых жестких пресс-формах для производства изделий сложной формы, является неравномерность распределения плотности, что напрямую связано с процессами пристенного трения при уплотнении порошков. В связи с этим, для изготовления подобных изделий используется технология предварительной токарно-фрезерной обработки спрессованных заготовок простой формы [1].

Перспективной и экономичной альтернативой перечисленным вариантам технологии производства изделий сложной формы является способ квазиизостатического прессования (КИП) [2]. В процессе КИП за счет всестороннего обжатия порошка, помещенного в эластичную оболочку, достигается высокая однородность распределения плотности по объёму компакта, что является следствием минимального влияния пристенного трения. Высокая равномерность распределения плотности компакта обеспечивает его равномерную усадку при спекании, минимальную анизотропию механических свойств и высокие прочностные характеристики изделий.

Таким образом КИП позволяет получать изделия сложной геометрии, требующие минимальной дополнительной механической обработки. Однако реализация КИП для ответственных керамических изделий конструкционного назначения должна базироваться на уверенности в том, что эксплуатационные свойства материала не ухудшаются при переходе на другую технологию производства.

Целью данной работы является комплексное сравнение механических характеристик керамических образцов, изготовленных прессованием в закрытых жестких пресс-формах и методом КИП в толстостенных эластичных оболочках.

**Материалы и методы исследования.** Для изготовления керамических образцов в качестве исходного материала использовали порошки диоксида циркония 3Y-SB-E (TOSOH, Япония) и 3Y-25A-B (Treibacher Industrie AG, Австрия).

Прессование порошков проводили одноосным односторонним прессованием (ОП) в стальной цилиндрической пресс-форме диаметром 10 мм и методом квазиизостатического прессования (КИП) в эластичной оболочке из полиуретана «Силагерм 5045», диаметр внутренней полости которой в свободном состоянии составлял 14 мм, высота - 16 мм.

Для корректного сравнения механических характеристик керамических образцов использовали давления прессования, обеспечивающие равную плотность компактов, полученных различными методами (таблица 1).

Таблица 1

Давление прессования и время изотермической выдержки при спекании

| режим материал | Давление ОП, МПа | Давление КИП, МПа | Выдержка при спекании, ч |
|----------------|------------------|-------------------|--------------------------|
| 3Y-SB-E        | 121              | 125               | 9,10                     |
| 3Y-25A-B       | 144              | 125               | 1,41                     |

Спекание спрессованных образцов проводили в высокотемпературной атмосферной печи LHT 08/18/P310 (Nobertherm, Германия), для получения заданной плотности керамики продолжительность изотермической выдержки была рассчитана по уравнению кривой зависимости усадки от времени (таблица 1). Прессовки были спечены при температуре 1400°C со скоростью изменения температуры 200°/ч.

Для определения плотности компактов использовали результаты взвешивания на аналитических весах, и рассчитывали объём образцов, используя линейные измерения, а также объём моделей, построенных в САПР SolidWorks на основе геометрических размеров прессовок, полученных методом КИП с искажениями правильной геометрической формы. Плотность всех керамических образцов определяли гидростатическим взвешиванием.

Испытание керамики на сжатие проводили по ГОСТ Р 57606-2017 при помощи гидравлического пресса ИП-500М авто (ЗАО «ЗИПО», Россия). Твёрдость определяли с помощью ультрамикротвердомера DUN-211S (Shimadzu, Япония) методом Виккерса. Упругие характеристики керамических образцов рассчитывались исходя из скорости распространения в них продольных и поперечных акустических волн, регистрацию которой проводили на ультразвуковом толщиномере 38DLPlus (Olimpus, США).

**Результаты.** Отличия в значениях плотности керамики, изготовленной различными методами, не выходит за пределы доверительного интервала (таблица 2).

Таблица 2

Плотность образцов до и после спекания

|                                     | КИП     |          | ОП      |          |
|-------------------------------------|---------|----------|---------|----------|
|                                     | 3Y-SB-E | 3Y-25A-B | 3Y-SB-E | 3Y-25A-B |
| Компакты $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | 48,97%  | 51,70%   | 48,53%  | 51,95%   |
| Керамика $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | 99,49%  | 99,29%   | 99,42%  | 99,30%   |

Порошок 3Y-SB-E в независимости от метода компактирования, демонстрирует более высокие прочностные характеристики, чем 3Y-25A-B. Керамика, спрессованная ОП, имеет предел прочности на сжатие на 20% выше для 3Y-SB-E и на 10% выше для 3Y-25A-B, чем керамика, спрессованная КИП (таблица 3). Более высокое значение предела прочности на сжатие керамики, спрессованной ОП, объясняется анизотропией механических свойств цилиндрических изделий, которая наследуется ими от одноосной схемы прессования. Таким образом, для более корректного сравнения методов по данной характеристике испытания следует проводить не только вдоль оси прессования, но и в ортогональных направлениях, усредняя полученные значения. На твердость и упругие характеристики метод компактирования существенного влияния не оказывает.

Таблица 3

*Механические характеристики керамики*

|                    | КИП                         |                             | ОП                          |                             |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
|                    | 3Y-SB-E                     | 3Y-25A-B                    | 3Y-SB-E                     | 3Y-25A-B                    |
| $\sigma_B$ , Па    | $(250 \pm 6) \times 10^7$   | $(236 \pm 6) \times 10^7$   | $(311 \pm 7) \times 10^7$   | $(261 \pm 6) \times 10^7$   |
| Микротвердость, HV | 1450 $\pm$ 11,9             | 1495 $\pm$ 5,6              | 1478 $\pm$ 5,4              | 1473 $\pm$ 7,8              |
| $\nu$              | 0,311                       | 0,310                       | 0,311                       | 0,311                       |
| G, Па              | $(831 \pm 0,5) \times 10^8$ | $(829 \pm 0,9) \times 10^8$ | $(839 \pm 0,3) \times 10^8$ | $(840 \pm 0,7) \times 10^8$ |
| E, Па              | $(218 \pm 0,1) \times 10^9$ | $(217 \pm 0,2) \times 10^9$ | $(219 \pm 0,1) \times 10^9$ | $(220 \pm 0,2) \times 10^9$ |

**Закключение.** Таким образом, керамика, изготовленная КИП, по большинству механических характеристик, изученных в работе, не уступает керамике, изготовленной прессованием в закрытых жестких пресс-формах. Это заключение в сочетании с существенной разницей в себестоимости готовой продукции дает основание полагать, что метод квазиизостатического прессования экономически более предпочтителен прессованию в закрытых жестких пресс-формах особенно в производстве керамических изделий сложной и/или индивидуальной формы.

Авторы выражают благодарность своему научному руководителю Двилису Э.С., д-ру. физ.-мат. наук, за ценные советы при планировании исследования и интерпретации полученных результатов. Все работы были проведены на базе НОИЦ НМНТ ТПУ.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Кондратьев А.И., Кузнецов А.В., Проничев Н.Д. Токарно-фрезерная обработка слоистой детали. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – Самара, 2012. – С. 90-91.
2. Чайка Э.В. Изготовление имплантатов сложной формы из биокерамики с помощью квазиизостатического прессования в пресс-формах из термопластичных материалов. // IV междисциплинарный научный форум с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии». – Москва., 2018. – С. 203-207.