

Дослідження формостійкості зразків із напівфабрикату у формі кільця з пластичного керамічного матеріалу на основі SiC, отриманого методом інжекційного формування

Т. О. Псярнецька¹ • М. О. Цисар¹ • О. О. Лещук¹

Received: 3 April 2021 / Accepted: 24 May 2021

Анотація. Розглянуто поняття формостійкості. На розробленій в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАНУ установці для інжекційного лиття виготовлено напівфабрикат у формі кільця з термопластичної маси на основі порошку SiC згідно встановлених технологічних параметрів, оптимізованих за результатами комп'ютерного моделювання. Представлено схеми навантаження та розділу кільця на зразки у формі призматичних сегментів. Запропоновано методику з підготовки дослідних зразків. Дослідження границі міцності під час стиску зразків із інжектованого напівфабрикату проведено на установці для механічних випробувань FP-5 та побудовано відповідний графік її зміни по сегментах кільця. Встановлено утворення бочкоподібної форми при випробуваннях зразків на стиск як вздовж радіального, так і дотичного напрямків. Визначено значення мінімального та максимального навантажень, при яких руйнуються зразки. Експериментально доведено збільшення ущільнення термопластичної маси навколо точки інжектування. Представлено схему та фактичне зображення розподілу тріщин в результаті руйнування зразків. Показано, що руйнування відбувається в зоні наявності розрахованих ліній снаю, які стали концентраторами напружень.

Ключові слова: формостійкість, стиск, інжекційне формування, границя міцності під час стиску, керамічний матеріал.

Вступ

За останні роки у практиці виготовлення керамічних виробів значне розповсюдження знайшло інжекційне формування (ІФ). Сутність методу полягає у тому, що для виготовлення виробів готується термопластична маса на основі порошку керамічного матеріалу і зв'язуючого, яка на першому етапі ІФ (інжекційне лиття) за допомогою спеціальних установок формується у литтєву заготовку виробу. Механізм ущільнення порошку – це структурна деформація порошкового тіла, яка полегшується за рахунок наявності в ньому зв'язуючого-пластифікатора. У випадку інжекційного лиття застосовують такі пластифікатори: парафін, крохмальний клейстер, розчини парафіну в бензині, парафіну в бензолі, каучуку в бензині, полівінілового спирту в воді, бакеліту в спирті, со-

поліаміду в спирті, метилцелюлози у воді та неорганічні речовини (глини, рідке скло). Також застосовують термопластичні смоли – полістерол, поліетилен, акрилову смолу. Крім того, використовують добавки, що підвищують пластичність порошкових пластифікованих сумішей та зменшують внутрішню та зовнішню тертя – ефіри жирних кислот, дібутилфтолат, діетилфтолат, стеарати та ін. Методом ІФ можна отримувати вироби з порошків металів, сплавів, тугоплавких сполук, оксидів, що повинні мати розміри частинок, менші за 10 мкм. Існує достатня кількість публікацій [1–5], в яких здебільшого висвітлено питання підготовки наповнювачів, керамічних порошків, підбору сумішей та властивості спечених після ІФ матеріалів. Проте проміжні етапи методу ІФ і досі є недостатньо вивченими. В цьому сенсі важливо знати властивості матеріалу напівфабрикатів, що формуються на етапі інжекційного лиття. На даний час відсутня будь-яка методика дослідження таких матеріалів.

В цій статті ми пропонуємо методику дослідження формостійкості зразків із напівфабрикату у формі кільця з пластичного керамічного матеріалу на основі SiC, отриманого методом ІФ на етапі лиття,

✉ T. Psiarnetska
t_tsysar@ism.kiev.ua

¹ Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля
НАН України, Київ, Україна

а також проводимо співставлення отриманих експериментальних даних з результатами комп'ютерного моделювання заповнення прес-форми для оцінки достовірності останнього.

Питання комп'ютерного моделювання є актуальним в теперішній час, оскільки такий підхід економічно вигідний – відсутні витрати електроенергії, керамічних та додаткових матеріалів, зношення прес-форм тощо. Таким чином, комп'ютерне моделювання не лише прискорює розробку технологічного процесу ІФ, а й робить його дешевшим. При цьому комп'ютерна модель повинна максимально відповідати реальному процесу. У випадку, якщо різниця між розрахунковою моделлю та реальним технологічним процесом ІФ суттєва, можливим є суттєвий виробничий брак, що буде коштувати набагато дорожче за натурні експерименти. Тому доцільно практикувати комбіновані дослідження, коли комп'ютерне моделювання поєднують з натурним експериментом.

Моделювання заповнення прес-форми дає нам можливість прогнозувати дефекти керамічних виробів, що виникають в його процесі. Відповідно, експеримент з формостійкості напівфабрикату дозволяє підтвердити достовірність комп'ютерного моделювання, а також провести відповідне корегування моделі.

Постановка задачі по визначенню формостійкості виробів з керамічних пластичних матеріалів

Поняття формостійкості пов'язано зі здатністю виробу знаходитись під впливом складної системи навантаження, відхилитись в допустимих межах та після розвантаження повертатись у вихідний стан [6]. Прямі методи дослідження формостійкості ґрунтуються на єдиному принципі оцінки критичних навантажень для плоских або об'ємних зразків, при яких відбувається їх руйнування. Саме цей взаємозв'язок між системою навантаження і формою зразка дозволяє визначити сильні та слабкі місця виробів, оцінити їх якість і конкурентоспроможність на сучасному ринку.

Метою даної роботи є дослідження впливу параметрів ІФ на формостійкість зразків із напівфабрикатів керамічних виробів у формі кільця, співставлення отриманих раніше розрахунків дефектності виробів при заповненні прес-форми (рис. 1) [7, 8] та реальної поведінки зразків в процесі експериментального руйнування.

Формостійкість розглядали, як утримання форми під впливом рівномірно розподіленого стиску по торцям кільця (рис. 2, а). Проте стискати все кільце не є доцільним, оскільки ми отримуємо інтегральну характеристику для виробу, а не відомості розподілу цих характеристик по об'єму виробу. Тому досліджували на стиск зразки, що вирізані з окремих

сегментів кільця. Кільце було розділено на 12 сегментів (рис. 2, б), а точка інжектування (див. рис. 1) знаходилась на лінії розділу між 1 та 12 сегментами.

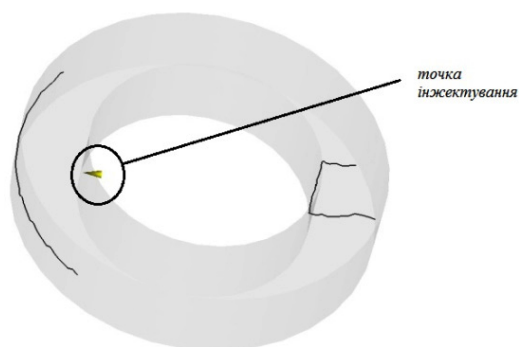


Рис. 1. Розподіл ліній спаю в кільці, що отриманий комп'ютерним моделюванням

Комп'ютерна модель ІФ дозволяє проаналізувати заповнення прес-форми в залежності від параметрів технологічного процесу та визначити дефекти у формі ліній спаю і повітряних пустот. В нашому випадку (див. рис. 1) серед дефектів даного виробу є лише лінії спаю, які можуть виступати в якості концентраторів напружень. Допускаємо, що біля точки інжектування матеріал буде більш ущільненим і, відповідно, зразки будуть мати більше значення критичного навантаження.

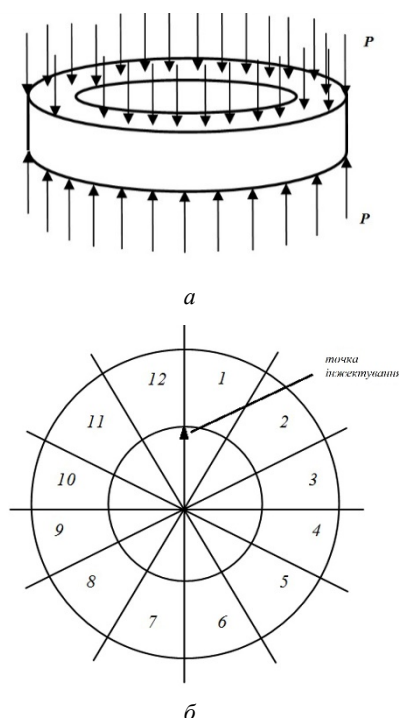


Рис. 2. До методики визначення формостійкості виробу у формі кільця: схема навантаження (а); схема розділу виробу на сегменти (б)

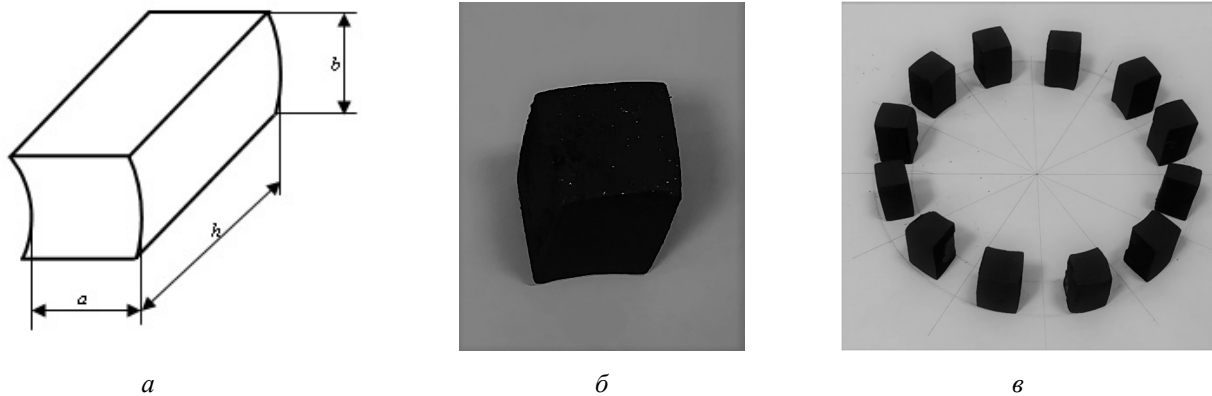


Рис. 3. Зображення зразка інжектваного матеріалу: схематичне (а), із збільшенням $\times 2$ (б), набір підготовлених зразків (в)

Зупинимось детально на підготовці дослідних зразків. Згідно схеми (див. рис. 2, б) розділяли кільце на 12 сегментів (рис. 3). З кожного сегменту вирізали зразок призматичної форми, ширина якого відповідає товщині кільця. Оскільки товщина кільця складала 10 мм, то і ширина зразку була в межах 10 мм.

За допомогою ручного інструменту типу лобзик марки Sparta 240245 з ріжучим полотном марки KL-0002 із стандартними зубцями (ширина полотна – 0,5 мм, товщина – 0,25 мм) [9, 10] відрізаємо сегмент кільця. Швидкість різання повинна бути однаковою протягом усього процесу підготовки зразка. Для уникнення накопичування зрізаної маси в площині зрізу її потрібно регулярно прибирати за допомогою повітряної струї. Це необхідно для того, щоб частки кераміки (вихідного порошку) не формували неконтрольовані глибокі борозни. Також слід уникати сколів зразка в процесі різання та контролювати зношення зубців. Для досягнення потрібної плоскопаралельності сторін призматичного зразка після відрізання притирали їх шліфувальним папером С149Ф 50-НМ.

Експериментальні результати

Випробовування підготовлених зразків керамічних пластичних матеріалів на основі SiC, отриманих методом ІФ, проводили на установці для механічних випробувань FP-5 [11] при навантаженнях до 1000 Н (похибка вимірювання – 1 Н). Результати вимірювань наведено в таблиці 1.

Для отримання більш чіткого уявлення з розподілу границі міцності під час стиску нами було побудовано відповідний графік (рис. 4). Як можна побачити, максимальне зусилля руйнування дійсно розташовано в зонах, що розташовані ближче до точки інжекування. Це пов'язано з тим, що в процесі інжекування відбувається допресовування термопластичної маси. Таким чином, в зоні вприску буде більш ущільнена маса ніж з протилежної сторони. Відповідний максимум границі міцності під час стиску відповідає

сегменту 1, а мінімум – сегменту 7, в об'ємі якого в результаті комп'ютерного моделювання було отримано максимальну довжину лінії спаю (див. рис. 1).

Таблиця 1. Границя міцності під час стиску досліджуваних зразків

№	a , мм	b , мм	h , мм	S , мм ²	P , Н	R_{cm} , МПа
1	10,1	10,0	19,2	101,00	680	6,73
2	10,1	10,2	19,2	103,02	630	6,12
3	10,1	10,4	19,2	105,04	615	5,85
4	10,1	10,1	19,2	102,01	585	5,73
5	10,1	10,2	19,2	103,02	575	5,58
6	10,1	10,0	19,2	101,00	515	5,10
7	10,1	10,1	19,2	102,01	500	4,90
8	10,1	10,1	19,2	102,01	585	5,73
9	10,1	10,4	19,2	105,04	610	5,81
10	10,1	10,3	19,2	104,03	615	5,91
11	10,1	10,1	19,2	102,01	625	6,13
12	10,1	10,2	19,2	103,02	635	6,16

S – площа поперечного перетину зразка
 P – навантаження руйнування

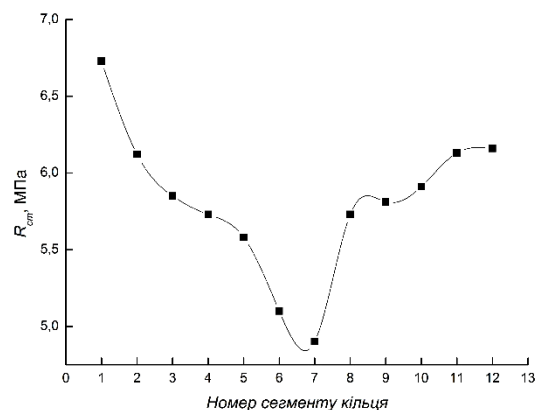


Рис. 4. Графік розподілу границі міцності по сегментах кільця (1–12) під час стиску

Розглянемо схеми руйнування зразків (рис. 5), щоб переконатись, що запропонована комп'ютерна модель дає максимально коректні результати з розподілу дефектів у формі ліній спаю.

Так для зразків 1, 2, 11, 12 руйнування відбувається за схемою, що зображена на рис. 5, а, б. Тут спостерігаємо утворення бочкоподібної форми по радіальному напрямленню кільця. Як можна побачити з рис. 5, б, від центральної тріщини, що починає фор-

муватися фактично з початку навантаження, відходять два промені, що направлені у вершини протилежної сторони призми від зовнішньої до внутрішньої поверхні кільця. При цьому саме формування вказаної центральної тріщини було попередньо спрогнозовано в результаті комп'ютерного моделювання (див. рис. 1).

Для зразків 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10 руйнування відбувається в діагональному напрямі за схемою, що зображена на рис. 5, в, г.

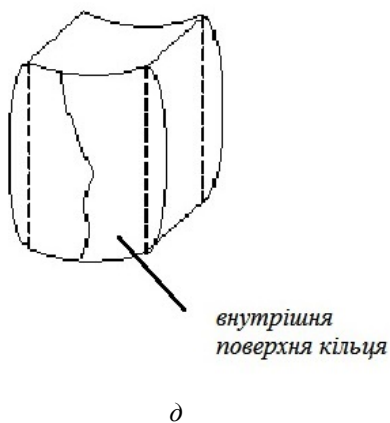
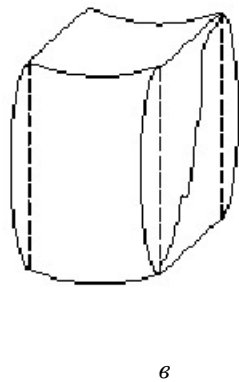
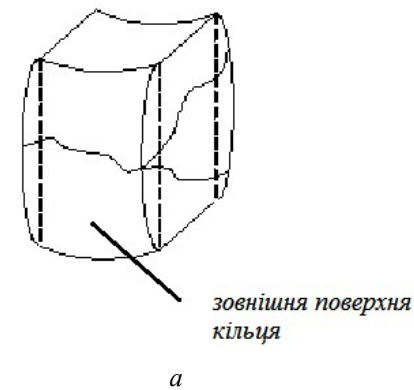


Рис. 5. Результати досліджень формостійкості досліджуваних зразків керамічних матеріалів: схема руйнування зразків 1, 2, 11, 12 (а, б); схема руйнування зразків 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10 (в, г); схема руйнування зразку 7 (д, е)

Для зразка 7 руйнування відбувається за схемою, що зображена на рис. 5, *д, е*. Тут спостерігаємо утворення бочкоподібної форми по дотичному напрямленню зразка. Тріщина сформувалася в центральній зоні по внутрішній поверхні кільця перпендикулярно основі, що досить чітко відповідає модельному представленню по формуванню ліній спаю в частині кільця, що розташована протилежно точці інжектування (див. рис. 1).

Висновки

Запропоновано методику експериментального дослідження формостійкості зразків керамічних пластичних матеріалів, отриманих методом ІФ.

Отримано експериментальні значення розподілу границі міцності під час стиску для виробу у формі кільця з керамічного матеріалу на основі SiC. Зафіксовано збільшення значень границі міцності термопластичної маси навколо точки інжектування, які в півтора рази перевищують відповідні значення з протилежної сторони кільця.

Встановлено утворення бочкоподібної форми при випробуваннях зразків на стиск, як вздовж радіального, так і дотичного напрямків.

В результаті дослідження керамічних пластичних зразків на стиск підтверджено задовільну відповідність експериментальних і розрахункових даних. Так, було показано, що руйнування відбувається в зоні наявності розрахованих ліній спаю, які стали концентраторами напружень.

References

- [1] V.V. Bilovol, "Mould filling simulations during powder injection moulding", Ph. D. Thesis, The Netherlands, Delft Univ. Technol., 2003.
- [2] V. Novikov, V.V. Ivzhenko, A.A. Leshchuk *et al.*, "Eksperimental'nye issledovaniya i modelirovanie inzhektionsionogo lit'ya izdelii slozhnykh form iz tekhnicheskoi keramiki", *Sverkhtv. Materialy*, No. 5, pp. 3–19, 2004.
- [3] N.V. Novikov, V.V. Ivzhenko, V.A. Popov *et al.*, "Oborudovanie dlya inzhektionsionogo lit'ya termoplastichnykh mass na osnovе keramicheskikh i keramikometallicheskh poroshkov", *Poroshk. Metallurgiya*, No. 9/10, pp. 115–123, 2004.
- [4] O.G. Frolova, L.N. Tkachenko, A.L. Maksimenko *et al.*, "Doslidzhennya tekhii shlikeru pri komp'yuternomu modelyuvanni tekhnologii inzheksiinogo formuvannya", *Matematicheskie modeli i vychislitel'nyi eksperiment v materialovedenii*, No. 9, pp. 228–234, 2007.
- [5] O.G. Frolova, L.N. Tkachenko, O.O. Leshchuk *et al.*, "Modelyuvannya zapovnennya shlikerom emnostei skladnoi formi", *Matematicheskie modeli i vychislitel'nyi eksperiment v materialovedenii*, No. 10, pp. 65–71, 2008.
- [6] V.A. Titov, "Problemy kharakteristiki formoustoichivosti i konkurentnosposobnosti shveinykh izdelii", *INNOVATSII*, No. 2 (89), pp.120–121, 2006.
- [7] T.O. Psyarnets'ka, O.G. Kirkova, O.O. Leshchuk *et al.*, "Rozrobka tekhnologii inzheksiinogo littyа keramichnikh virobiv z vikoristannyam komp'yuternogo modelyuvannya", *Poroshkova metalurgiya*, No. 3/4, pp. 28–46, 2021.
- [8] DSTU 7809:2015, "Prokat sortovii, kalibrovanii iz spetsial'nim obroblynyam poverkhni z vugletsevoi yakisnoi konstruktsiinoi stali. Zagal'ni tekhnichni vimogi".
- [9] DSTU 8429:2015, "Prokat iz resorno-pruzhinnoi vugletsevoi ta legovanoi stali. Tekhnichni umovi".
- [10] GOST 5009-82, "Shkurka shlifoval'na paperova vodostiika. Tekhnichni umovi".
- [11] GOST 27034-86 (ISO 4506-79), "Splavy tverdye spechennye. Metod opredeleniya predela prochnosti i predela tekuchesti pri szhatii".

Исследование формостойкости образцов из полуфабриката в форме кольца из пластического керамического материала на основе SiC, полученного методом инъекционного формования

Т. А. Псярнецька, М. А. Цысар, А. А. Лещук

Аннотация. Рассмотрено понятие формостойкости. На разработанной в Институте сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАНУ установке для инъекционного литья изготовлено полуфабрикат в форме кольца из термопластичной массы на основе порошка SiC согласно установленным технологическим параметрам, оптимизированных по результатам компьютерного моделирования. Представлены схемы нагрузки и раздела кольца на образцы в форме призматических сегментов. Предложена методика по подготовке опытных образцов. Исследование предела прочности при сжатии образцов из инжесктированного полуфабриката проведено на установке для механических испытаний FP-5 и построен соответствующий график его изменения. Установлено получение бочкообразной формы при испытаниях образцов на сжатие как вдоль радиального, так и касательного направлений. Определены значения минимального и максимального нагружения, при которых разрушаются образцы. Экспериментально доказано увеличение уплотнения термопластичной массы вокруг точки инжесктирования. Представлены схема и фактическое изображение распределения трещин в результате разрушения

образцов. Показано, что разрушение происходит в зоне наличия рассчитанных линий смятия, которые стали концентраторами напряжений.

Ключевые слова: формостойкость, сжатие, инжекционное формование, предел прочности при сжатии, керамический материал.

Investigation of shape stability of semi-finished samples in the form of a ring made of plastic ceramic material based on SiC, obtained by injection molding

T. O. Psiarnetska, M. O. Tsysar, O. O. Lyeshchuk

Abstract. The concept of form stability is considered. A semifinished product in the form of a ring from a thermoplastic mass based on SiC powder has been made on the installation for injection molding developed at the Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine in accordance with the established technological parameters optimized by the results of computer modeling. Schemes of loading and dividing the ring into samples in the form of prismatic segments are presented. A technique for the preparation of experimental samples is proposed. The study of the compressive strength of the samples from the injected semi-finished product has been carried out on the FP-5 mechanical test machine and a corresponding dependence of its change has been constructed. The formation of a barrel shape during compression tests of samples, both along the radial and tangential directions, has been established. The values of the minimum and maximum loads at which the samples are destroyed have been determined. An increase in the compaction of the thermoplastic mass around the injection point has been experimentally proved. The scheme and the actual image of crack distribution as a result of destruction of samples have been presented. It is shown that the failure occurs in the area of the presence of the calculated parting lines, which have become stress concentrators.

Keywords: form stability, compression, injection molding, compressive strength, ceramic material.