

## КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНЖЕКЦІЙНОГО ЛИТТЯ КЕРАМІЧНИХ ВИРОБІВ РІЗНОГО ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Tsysar T., Lyeshchuk O.

Bakul Institute for Superhard Materials NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine (t\_tsysar@ism.kiev.ua)

### COMPUTER-AIDED MODELING OF INJECTION MOULDING OF DIFFERENT FUNCTIONAL CERAMIC ITEMS

*Проведено комп'ютерне моделювання процесу інжекційного лиття керамічних виробів. Отримано розподіли тиску в порожнині прес-форми та часу її заповнення термопластичною масою у процесі інжектування. Визначено оптимальне місцерозташування інжекційного отвору, при якому спостерігається мінімальна довжина ліній спаю у виробі в кінці процесу. Встановлені залежності часу заповнення прес-форми та довжини ліній спаю при різній в'язкості матеріалу від розмірного параметру виробу.*

*Ключові слова:* комп'ютерне моделювання, інжекційне лиття, інжекційне формування, лінія спаю.

#### Вступ

Інжекційне формування (ІФ) – це аналог гарячого шлікерного лиття, в якому використовують тиски до 0,5 МПа. В технології ІФ тиски інжекції складають 10–100 МПа. Технологія ІФ характеризується високою продуктивністю і стабільністю процесу, дозволяє застосовувати нескладне і недороге обладнання. Цим методом можна отримувати вироби складної геометричної форми, в тому числі тонкостінні і багатоступінчасті вироби, які складно виготовити традиційними методами формування. Суть методу полягає в отриманні термопластичної маси, що складається з порошку твердого матеріалу та органічного зв'язуючого, з наступним інжектуванням цієї маси у металеву прес-форму та її охолодженням до температури затвердіння зв'язуючого. При цьому формується заготовка з конфігурацією порожнини прес-форми. Далі заготовку нагрівають для відгонки зв'язуючого та спікають для отримання кінцевого виробу. Основні закономірності отримання керамічних виробів методом ІФ описані в роботі [1]. Використання ІФ значно збільшує вихід гідних виробів складних форм з керамічних порошків завдяки підвищенню фізико-механічних властивостей матеріалу виробу. Економічні переваги технології ІФ полягають в збільшенні виходу гідної продукції в 2–3 рази, зменшенні витрат на матеріали в 1,5 рази і, як наслідок, зменшенні собівартості виробів до 2 разів.

#### Мета

Мета даної роботи полягає в комп'ютерному моделюванні оптимальних значень технологічних параметрів формування керамічних виробів на основі нітриду алюмінію залежно від їх розміру, типу матеріалу, місцерозташування інжекційного отвору у прес-формі.

#### Розрахунки

Методика комп'ютерного моделювання інжекційного лиття керамічних виробів складної форми розроблена і вперше застосована нами в роботі [2]. Після цього її використовували для оптимізації процесів

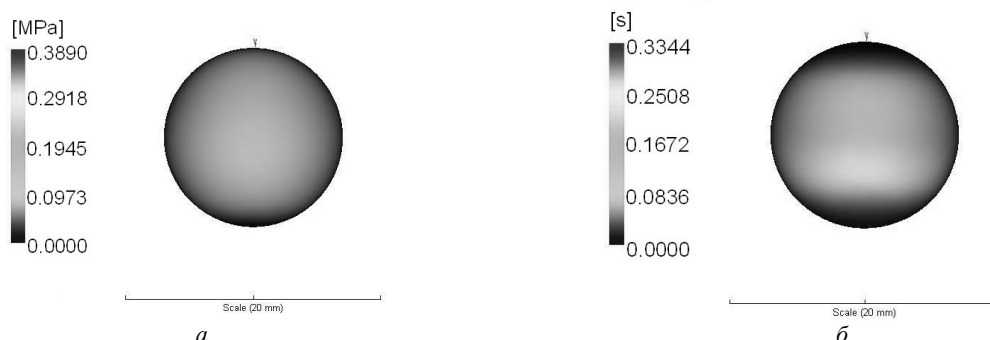
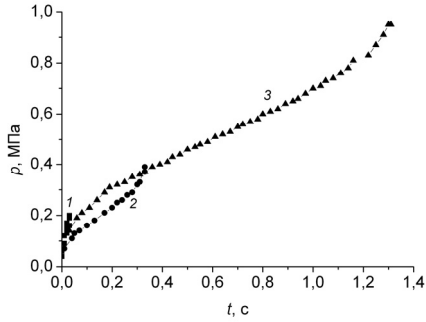


Рис. 1. Розподіл тиску у порожнині прес-форми для виготовлення суцільної кулі (а) та часу її заповнення термопластичною масою (б)



**Рис. 2.** Зміна тиску біля інжекційного отвору при литті суцільної кулі різного діаметру:  
1 – 6 мм, 2 – 14 мм, 3 – 22 мм

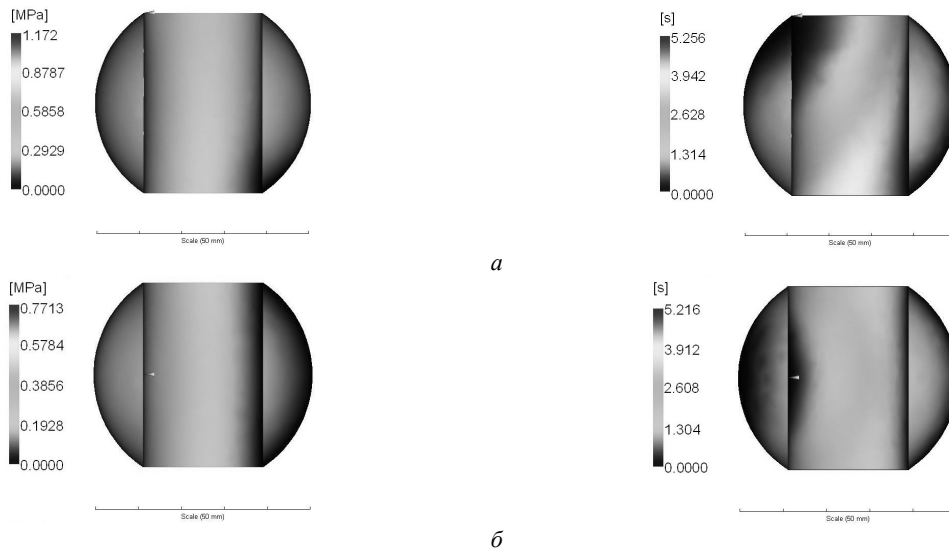
монотонне зростання тиску у часі лиття, а також підвищення баричного максимуму зі збільшенням розмірів виробу, що формується.

інжекційного формування різноманітних керамічних виробів [3–5].

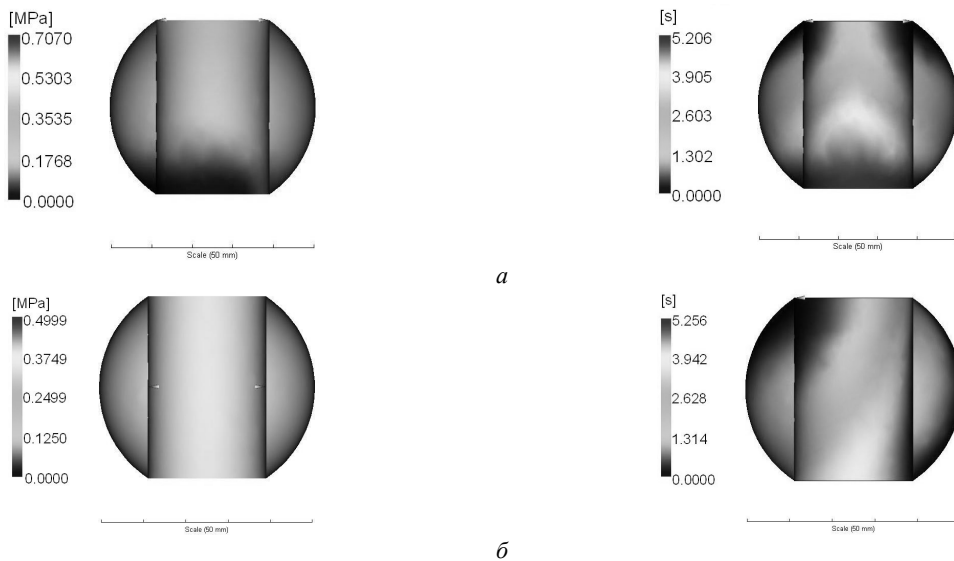
Основним технологічним параметром інжекційного лиття є швидкість подачі термопластичної маси в порожнину прес-форми, що завжди задавали постійною з метою порівняльного аналізу розрахункових результатів. Ефективну в'язкість термопластичної маси вибирали, виходячи з об'ємної концентрації керамічного порошку.

Розглянемо результати комп'ютерного моделювання процесу заповнення порожнини прес-форми для виготовлення виробу у вигляді суцільної кулі (рис. 1). Як видно, тиск розподіляється достатньо рівномірно. Його максимум локалізується в області інжекційного отвору. В нижній частині кулі тиск дорівнює нулю. Час заповнення має зворотній характер: нижня частина порожнини заповнюється більш повільно ніж верхня.

Зміна тиску біля інжекційного отвору в процесі лиття виробу в формі суцільної кулі представлена на рис. 2. Тут спостерігається



**Рис. 3.** Розподіл тиску у порожнині прес-форми для виготовлення кулі з отвором та часу її заповнення термопластичною масою (інжекційний отвір розташований в верхній частині (а) та посередині отвору кулі (б))



**Рис. 4.** Розподіл тиску у порожнині прес-форми для виготовлення кулі з отвором та часу її заповнення термопластичною масою (інжекційні отвори розташовані в верхній частині (а) та посередині отвору кулі (б))

Розглянемо результати комп'ютерного моделювання процесу заповнення порожнини прес-форми для виготовлення виробу у вигляді кулі з осьовим циліндричним отвором (рис. 3). Як видно, тиск в кінці процесу розподіляється достатньо рівномірно. Його максимум локалізується в області інжекційного отвору, який розташований в верхній частині (рис. 3, *а*) та посередині (рис. 3, *б*) отвору кулі. Картина розподілу часу заповнення має зворотній характер.

Результати комп'ютерного моделювання процесу заповнення порожнини прес-форми для виготовлення виробу у вигляді порожнистої кулі у разі застосування двох інжекційних отворів наведені на рис. 4. У цьому випадку максимум тиску локалізується в області інжекційних отворів, які розташовані в верхній частині (рис. 4, *а*) та посередині (рис. 4, *б*) отвору кулі.

Графіки зміни тиску біля інжекційного отвору в процесі лиття виробу у формі кулі з осьовим отвором представлені на рис. 5. Тут спостерігається монотонне зростання тиску у часі лиття, а також зменшення баричного максимуму зі збільшенням розмірів отвору у виробі, що формується.

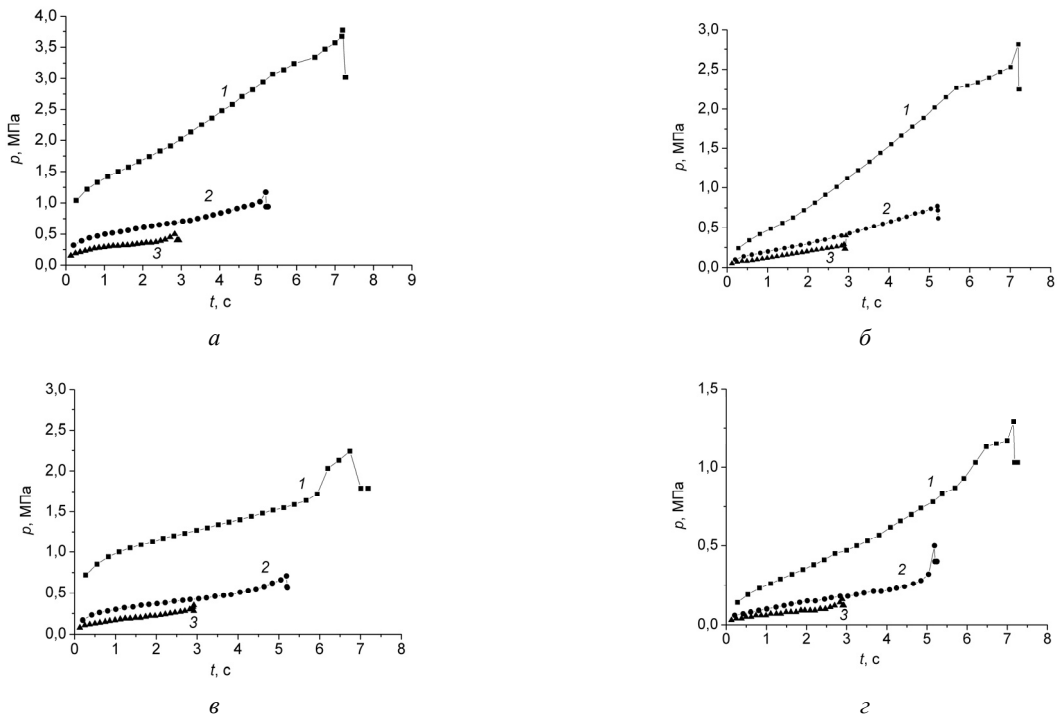


Рис. 5. Зміна тиску в місці інжектування при литті кулі з отвором різного діаметру: 1 – 20 мм, 2 – 28 мм, 3 – 36 мм (один інжекційний отвір розташований в верхній частині (*а*) та посередині (*б*) отвору кулі, два інжекційні отвори розташовані в верхній частині (*в*) та посередині (*г*) отвору кулі)

На рис. 6. представлено розподіл ліній спаю у сформованій порожнистій кулі. Видно, що мінімальна довжина ліній спаю спостерігається при використанні одного інжекційного отвору, що розташований у верхній частині кулі (рис. 6, *а*).

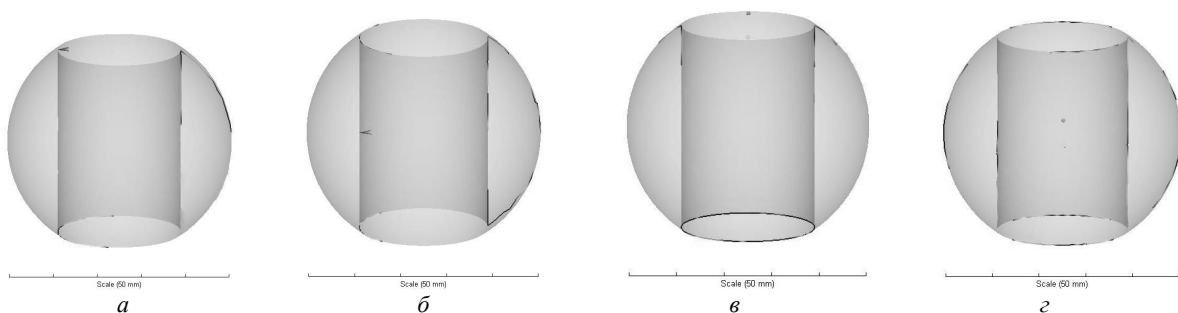


Рис. 6. Розподіл ліній спаю у порожнистій кулі (один інжекційний отвір розташований в верхній частині (*а*) та посередині (*б*) отвору кулі, два інжекційні отвори розташовані в верхній частині (*в*) та посередині (*г*) отвору кулі)

На рис. 7 зображені залежності довжини ліній спаю від діаметру отвору кулі при різних в'язкості термопластичної маси. Видно, що зі збільшенням діаметра отвору виробу збільшується довжина ліній спаю.

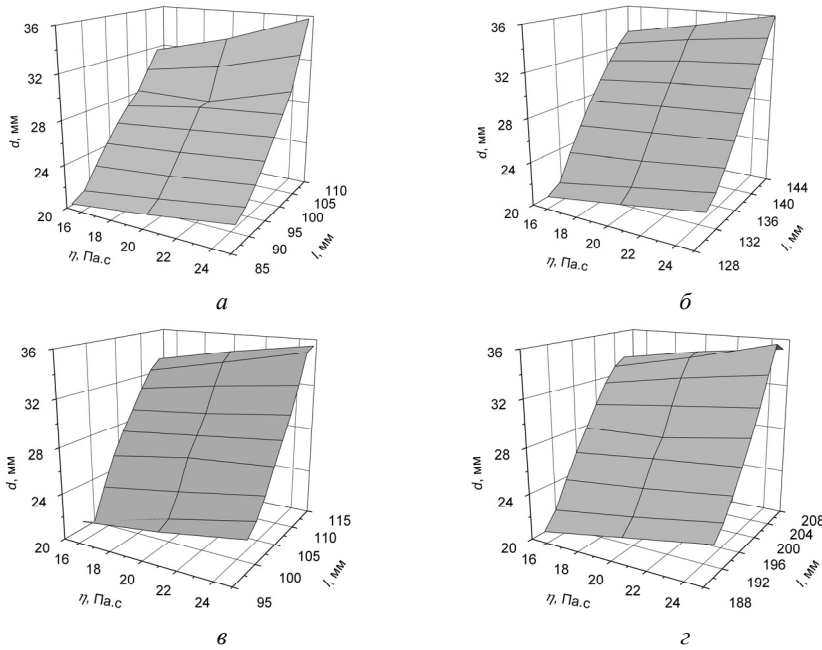


Рис. 7. Залежності довжини ліній спаю від діаметру отвору кулі при різних в'язкості термопластичної маси (один інжекційний отвір розташований в верхній частині (а) та посередині (б) отвору кулі, два інжекційні отвори розташовані в верхній частині (в) та посередині (г) отвору кулі)

Розглянемо результати комп'ютерного моделювання процесу заповнення порожнини прес-форми для виготовлення виробу у вигляді сопла. Моделювання проводили для трьох випадків: інжекційний отвір знаходиться з вхідного, вихідного кінця сопла, з обох кінців одночасно (рис. 8). З аналізу рисунку видно, що розподіл тиску в порожнині прес-форми та часу її заповнення має різний характер в залежності від розташування інжекційних отворів.

Графіки зміни тиску біля інжекційного отвору в процесі лиття виробу у формі сопла представлені на рис. 9. Характер зміни тиску повністю співпадає з результатами, що отримані для порожнистої кулі.

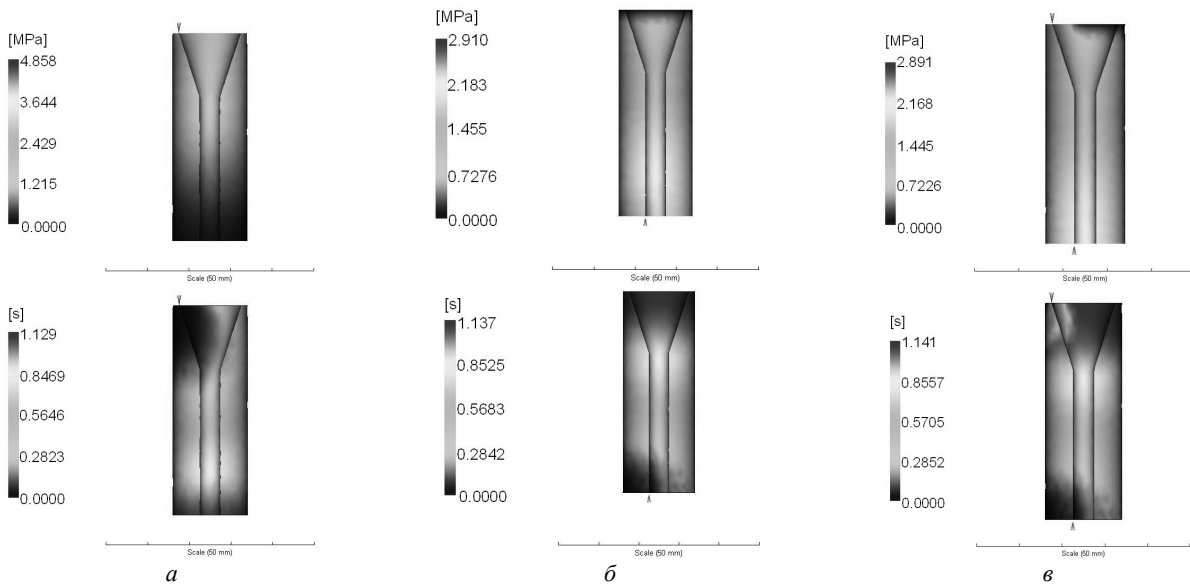


Рис. 8. Розподіл тиску у порожнині прес-форми для виготовлення сопла та часу її заповнення термопластичною масою (інжекційний отвір знаходиться з вхідного (а), вихідного (б), обох (в) кінців сопла)

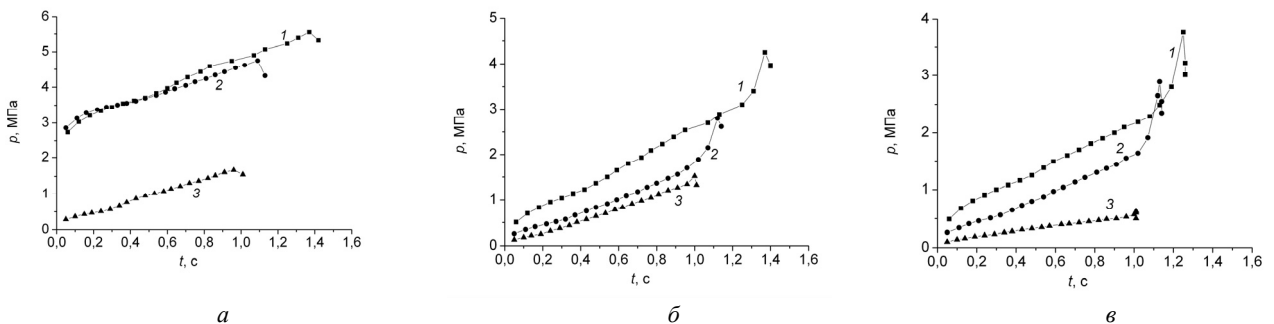


Рис. 9. Зміна тиску біля інжекційного отвору в процесі лиття сопла з різним діаметром вихідного отвору: 1 – 2,5 мм, 2 – 5 мм, 3 – 8 мм (інжекційний отвір знаходиться з вхідного (а), вихідного (б), обох (в) кінців сопла)

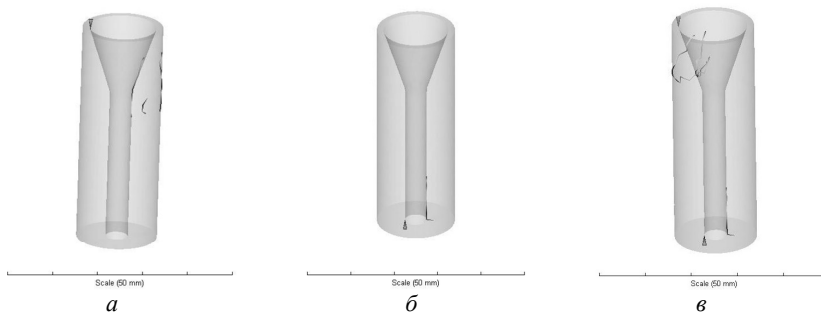


Рис. 10. Розподіл ліній спаю в виробі у формі сопла (інжекційний отвір знаходиться з вхідного (а), вихідного (б), обох (в) кінців сопла)

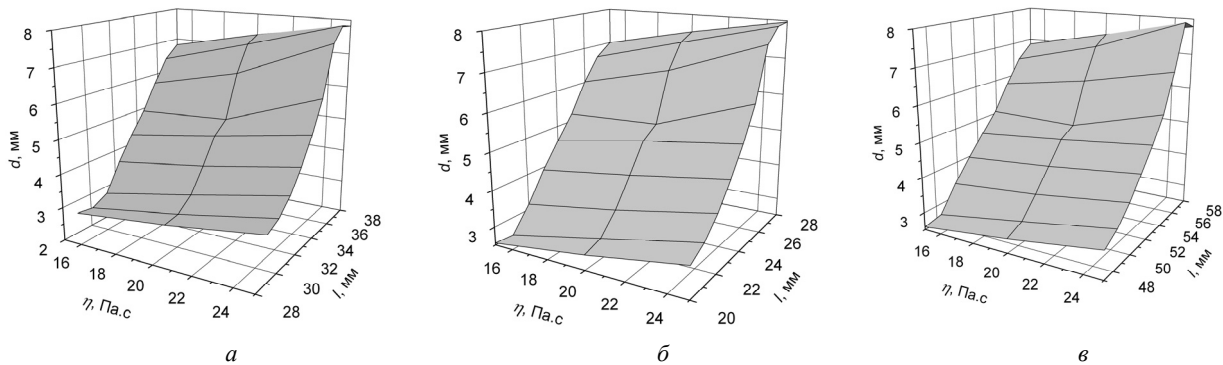


Рис. 11. Залежності довжини ліній спаю від діаметру вихідного отвору сопла при різній в'язкості термопластичної маси (інжекційний отвір знаходиться з вхідного (а), вихідного (б), обох (в) кінців сопла)

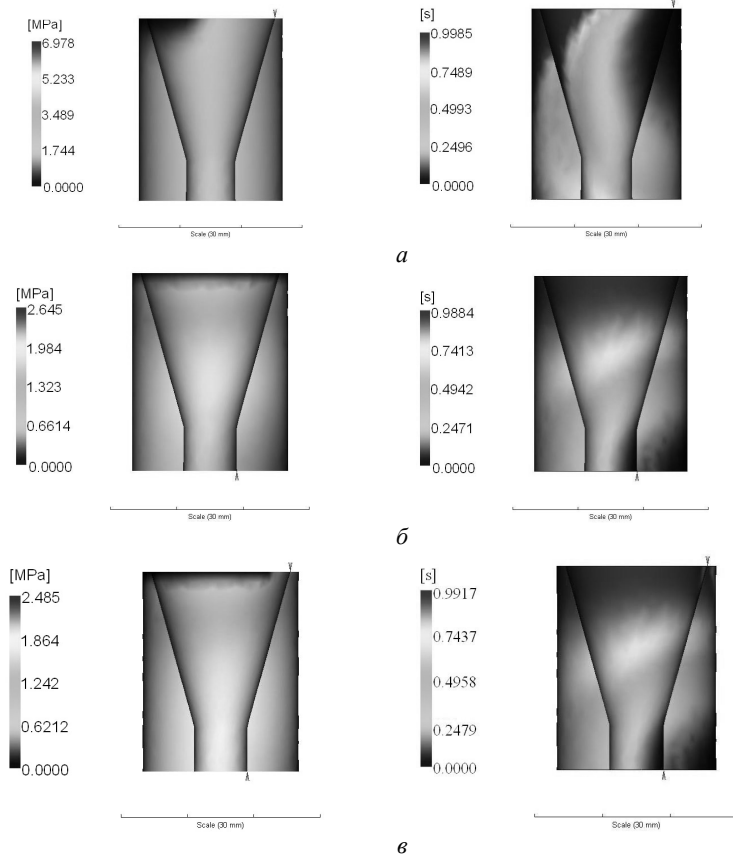


Рис. 12. Розподіл тиску у порожнині прес-форми для виготовлення воронки та часу її заповнення термопластичною масою (інжекційний отвір знаходиться з вхідного (а), вихідного (б), обох (в) кінців сопла)

На рис. 10 представлено розподіл ліній спаю в виробі у сформованому соплі. Мінімальна довжина ліній спаю спостерігається при використанні одного інжекційного отвору зі сторони вихідного отвору сопла (рис. 10, б).

Залежності довжини ліній спаю від діаметру вихідного отвору сопла при різній в'язкості термопластичної маси представлені на рис. 11.

Розглянемо результати комп'ютерного моделювання процесу заповнення порожнини прес-форми для виготовлення виробу у вигляді воронки. У цьому випадку можна спостерігати достатньо нерівномірний розподіл тиску в різних частинах виробу. Його максимум завжди локалізується біля інжекційного отвору. У разі застосування одного інжекційного отвору мінімальне значення тиску спостерігається з іншого краю отвору воронки (рис. 12, а, б). При застосуванні двох інжекційних отворів мають місце два локальних максимуми тиску, а його мінімум знаходиться біля вхідного отвору воронки (рис. 12, в).

Графіки зміни тиску біля інжекційного отвору в процесі лиття воронки представлені на рис. 13.

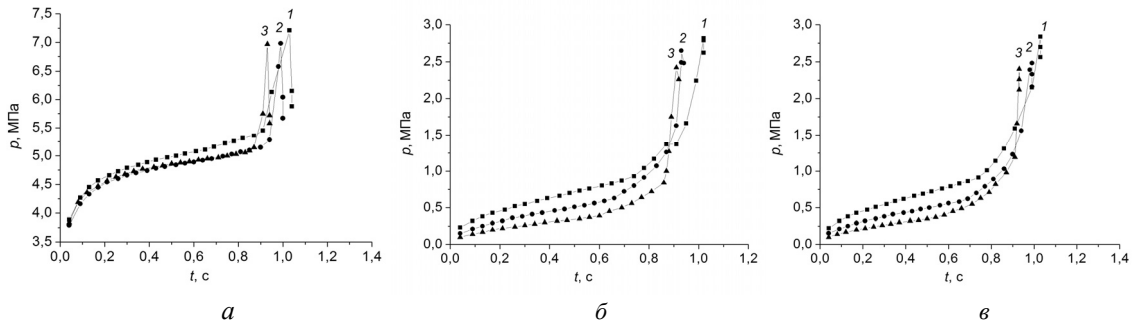


Рис. 13. Зміна тиску біля інжекційного отвору в процесі лиття воронки з різним діаметром вихідного отвору: 1 – 6 мм, 2 – 8 мм, 3 – 10 мм (інжекційний отвір знаходиться з вхідного (*a*), вихідного (*б*), обох (*в*) кінців сопла)

Розподіл ліній спаю в виробі у формі воронки представлений на рис. 14.

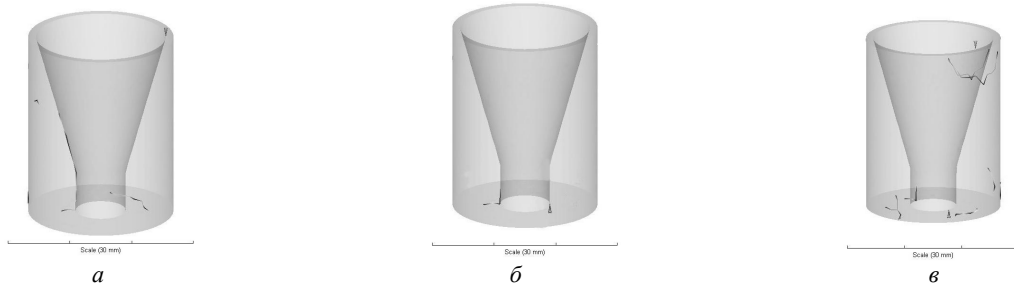


Рис. 14. Розподіл ліній спаю в виробі у формі воронки (інжекційний отвір знаходиться з вхідного (*a*), вихідного (*б*), обох (*в*) кінців сопла)

Залежності довжини ліній спаю від діаметру вихідного отвору воронки при різній в'язкості термопластичної маси представлені на рис. 15.

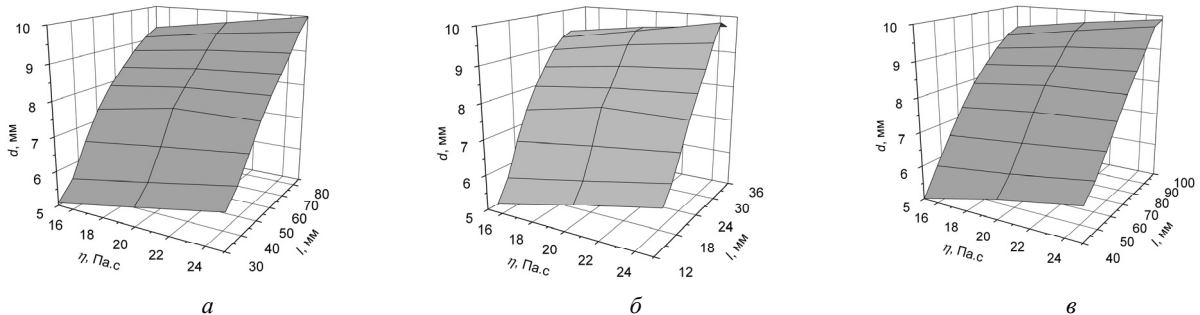


Рис. 15. Залежності довжини ліній спаю від діаметра вихідного отвору воронки при різній в'язкості термопластичної маси

На рис. 16 представлено деякі приклади графіків часу заповнення прес-форми в залежності від діаметру суцільної кулі (рис. 16, *a*), діаметру отвору порожнистої кулі (рис. 16, *б*), діаметру вихідного отвору сопла (рис. 16, *в*), діаметру вихідного отвору воронки (рис. 16, *г*). Такі дані є важливими параметрами формування, оскільки вони дозволяють оптимізувати тривалість процесу інжектування, підвищувати строк експлуатації інжекційних сопел і продуктивність установки в цілому.

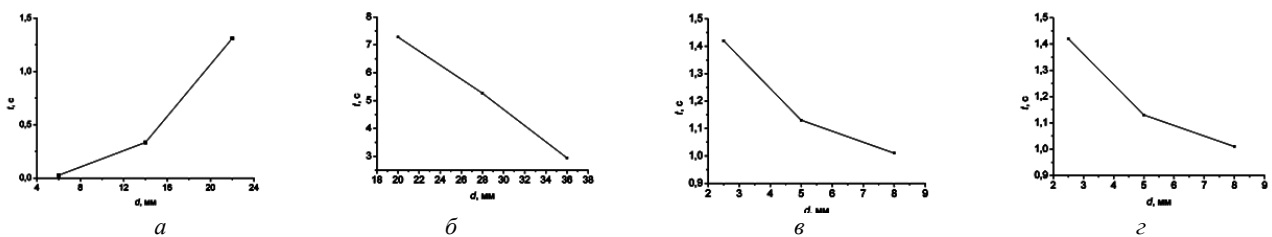


Рис. 16. Графіки зміни часу заповнення порожнини прес-форми різних виробів

**Висновки**

В результаті комп'ютерного моделювання процесу інжектування в порожнину прес-форм для виготовлення виробів у формі суцільної кулі, кулі з осьовим циліндричним отвором, сопла та воронки термопластичної маси на основі порошку нітриду алюмінію встановлені кореляційні залежності: часу заповнення прес-форм від характерного діаметру виробу; довжини ліній спаю від характерного діаметру виробу та в'язкості термопластичної маси.

*Аннотация.* Проведено компьютерное моделирование процесса инжекционного литья керамических изделий. Получены распределения давления в полости пресс-формы и времени ее заполнения термопластичной массой в процессе инжектирования. Определено оптимальное месторасположение инжекционного отверстия, при котором наблюдается минимальная длина линий спаивания в изделии в конце процесса. Установлены зависимости времени заполнения пресс-формы и длины линий спаивания при разной вязкости материала от размерного параметра изделия.

*Ключевые слова:* компьютерное моделирование, инжекционное литье, инжекционное формование, линия спаивания.

**Abstract.**

*Purpose.* Computer-aided modeling of optimal values of technological parameters of aluminium nitride-based ceramic items moulding depending on their size, material, site of the injection opening in a press-form.

*Methodology.* Technological research of injection moulding regularity of the complex form products from technical ceramics and computer optimization of process.

*Findings.* The computer-aided modeling of ceramic items injection moulding has been executed. The pressure and mould filling time fields in the mould cavity during the injection have been derived. The optimal local position of the injection openings, when a minimal length of weld lines in item at the end of process is observed, has been determined. The dependences of mould filling time and length of weld lines with deferent viscosity of materials on diameter of item have been defined. The output data for development of technologies of mass production of products from technical ceramics are obtained.

*Keywords:* Computer-aided Modeling, Injection Casting, Injection Moulding, Weld Line.

1. German R. M. Powder injection molding. – Princeton: Metal Powd. Industr. Fed., 1990. – 521 p.
2. Фролова О. Г. Моделивання заповнення шлікером емностей складної форми / Фролова О. Г., Ткаченко Л. Н., Лещук О. О. та ін. // Математические модели и вычислительный эксперимент в материаловедении: Тр. ИПМ. – 2008. – Вып. 10. – С. 65–71.
3. Цысарь Т. А. Компьютерное моделирование процесса инжекционного литья изделий из термопластичных материалов / Цысарь Т. А., Лещук А. А., Ивженко В. В. // Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов: Сб. науч. тр. Сер. Материаловедение. – Киев: Ин-т сверхтв. материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2010. – С. 163–169.
4. Цысар Т. О. Визначення параметрів процесу інжекційного формування на основі комп'ютерного моделювання // Вісн. НТУУ «КПІ». Сер. Машинобудування. – 2010. – Вип. 58. – С. 116–121.
5. Новіков М. В. Комп'ютерне моделювання технології інжекційного формування виробів з функціональної кераміки / Новіков М. В., Лещук О. О., Цысар Т. О. // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Сер. Механіка. – 2011. – Вип. 15, т. 2, № 5. – С. 179–188.

**REFERENCES**

1. German R. M. Powder injection molding. – Princeton: Metal Powd. Industr. Fed., 1990. – 521 p.
2. Tsysar T. O., Lyeshchuk O. O., Ivzhenko V. V. Komp'juternoe modelirovanie processa inzhektionnogo lit'ja izdelij iz termoplastichnyh materialov [Computer simulation of the injection casting process of items of thermoplastic materials]: Zb. nach. tr. Bakul Institute for Superhard Materials NAS of Ukraine. Kiev. 2010. pp. 163–169.
3. Tsysar T. O. Vyznachennja parametriv procesu injekcijnogo formuvannya na osnovi komp'juternogo modeljuvannya [Determination of parameters of injection moulding based on computer modeling], Journal of Mechanical Engineering of NTUU «KPI», 2010, no 58, pp. 116–121.
4. Novikov M. V., Lyeshchuk O. O., Tsysar T. O. Komp'juterne modeljuvannya tehnologii injekcijnogo formuvannya vyrobiv z funkcional'noi keramiki [Computer simulation of injection moulding technology of functional ceramic items] Journal of Mechanical Engineering of Gonchar NUU, Dnipropetrovck, 2011, no 15, T.2, no.5, pp. 179–188.
5. Frolova O. G., Tkachenko L. N., Lyeshchuk O. O., etc. Modeljuvannya zapovnennja shlikerom emkostej skladnoj formy [Modeling of slip filling of moulds with complex shapes]: tr. IPM. 2008, no 10, pp. 65–71.