

О.В. Нейма, мол. наук. співр., e-mail: neima_alex@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-5438-7253>

О.Й. Шинський, д-р техн. наук, проф., зав. відділу, e-mail: aluprt@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6200-0709>

П.Б. Калюжний, канд. техн. наук, заст. директора, e-mail: kpb.ptima@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1111-4826>

О.В. Михнян, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: mixnyan@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-3210-4173>

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

Розробка режимів видалення 3D-друкованих полімерних моделей з керамічних ливарних форм

Використання адитивних технологій, зокрема 3D-друку, для виготовлення моделей замість традиційних воскових моделей є перспективним для методу лиття в керамічні форми. Однак при використанні полімерних моделей існує проблема розтріскування керамічних оболонок при їх випалюванні. Мета роботи полягала у розробці оптимальних термо-кінетичних режимів видалення разових пластикових моделей з керамічних форм, що запобігатимуть утворенню тріщин в кераміці. В ході дослідження було підібрано та досліджено зразки моделей, виготовлених 3D-друком з різних пластиків. Лабораторні випробування проведено на партії керамічних оболонок із електрокорунду. Досліджено методи видалення пластикових моделей з керамічних форм шляхом двоетапного випалювання в термічних печах. Низькотемпературний етап випалювання полягав у поступовому нагріванні кераміки до 350 °С. Під час нього відбувалося компактування, розм'якшення, розплавлення та часткова газифікація матеріалу моделей. Це зменшувало неконтрольований тиск газів і напруження у кераміці та запобігало утворенню тріщин у ній. Високотемпературна фаза випалювання (1000–1100 °С) виконувалася для спікання кераміки та видалення залишків пластикових матеріалів. Досліджено вплив різних пластикових матеріалів на якість ливарної форми. Запропоновано використовувати PLA пластик для 3D-друку моделей, оскільки він відповідає вимогам екологічності та вартості. Також розглянуто можливість покращення якості поверхні керамічних оболонок за допомогою покриття тонким шаром воскоподібного матеріалу. За результатами досліджень поверхні керамічних форм запропоновано додавати конструктивні елементи до пластикових моделей, які зменшують деформації керамічних форм під час випалювання. Розроблені режими випалювання моделей використані при виготовленні керамічних форм для ендопротезів.

Ключові слова: полімерна модель, 3D-друк, точне лиття, керамічна форма, випалювання, тріщиноутворення.

Для одержання складнопрофільних точних виливків в одиничному та малосерійному виробництві перспективною є технологія лиття в керамічні оболонкові форми з використанням випалюваних пластикових, порошкових, фотополімерних моделей, виготовлених за допомогою адитивних технологій (3D-друку). В порівнянні з традиційною технологією лиття в керамічні оболонкові форми, де використовують воскові моделі, які витоплюють, застосування адитивних технологій для виготовлення полімерних моделей дозволяє скоротити термін їх виготовлення, виключивши значні витрати на оснастку.

Адитивні технології сприяють розвитку цього способу лиття для отримання точних і складних по конфігурації виливків з легованих сталей і спеціальних сплавів, значно покращуючи його економічні показники. Також використання 3D-друку дозволяє підвищити гнучкість виробництва, оскільки

при будь-якій зміні конструкції виливка або ливникової системи необхідно лиш внести зміну в CAD-модель і відразу ж можливо розпочинати виготовлення нового комплексу моделей, минаючи трудомісткий та енергозатратний етап створення оснастки, що особливо актуально при точному литті складнопрофільних виливків. Відсутність обмежень, які зазвичай пов'язані з використанням оснастки, дозволяє проєктувати та виготовляти деталі необмеженої складності. Час на підготовку та проєктування виробництва виливків скорочується у декілька раз [1]. Дякуючи можливості швидкого корегування конструкції виливків в процесі відпрацювання технології лиття, забезпечується: зменшення припусків, зменшення маси виливків, збільшення їх якості. Отже, за рахунок використання досвіду традиційних технологій виготовлення керамічних форм та доповнюючи його особливими технологічними прийомами з викори-

станням 3D-друкованих моделей, можна отримати складнопрофільні виливки майже з будь-яких сплавів.

Під 3D-друком розуміють метод пошарового виробництва готового виробу за його тривимірним кресленням — 3D-моделлю. Товщина шарів вибирається залежно від необхідної якості кінцевої поверхні, міцності, призначення виробу та може складати від 25 до 400 мкм, залежно від способу друку (SLA, SLS, FDM) та характеристик 3D-принтера. Оскільки 3D-друк дозволяє виготовити полімерні моделі складної геометрії безпосередньо з тривимірних CAD-креслень без будь-якого модельного оснащення, то при невеликій серійності виробництва такі пластикові моделі є перспективними для використання замість воскових або пінополістиролових моделей при литті в оболонкові керамічні форми.

Однак приклади застосування таких пластиків (полімерів) в якості разових моделей [2—5] показують, що існує проблема розтріскування керамічної оболонки під час видалення моделей шляхом випалювання, а також можливість утворення зольного залишку, що вказує на необхідність та актуальність розробки ефективних методів видалення полімерних моделей із керамічних форм.

Розтріскування оболонок переважно пов'язують з тепловим розширенням пластикових моделей та неконтрольованим газовиділенням під час їх випалювання. Дослідження впливу пластикових моделей на теплові напруження в керамічних оболонках при випалюванні (180—250 °C) та при прожарюванні (1100 °C) [6] продемонстрували, що утворення тріщин у керамічних формах відбувається внаслідок механічних і термічних напружень. Останні виникають при нагріванні пластикових моделей внаслідок їх теплового розширення, а також при їх переході в склоподібний стан.

Моделі з пластику зазвичай друкуються або суцільними, або ж з внутрішніми порожнинами (порожнистими). Дослідження властивостей різних друкованих моделей та керамічних форм, виготовлених за ними, показують [7], що порожнисті моделі дають кращу розмірну точність та кращу чистоту поверхні форми. Для компенсації термічного розширення та уникнення тріщин в керамічних формах часто моделі виготовляють у режимі Quick Cast [8]. При цьому, модель виготовляється порожнистою, з внутрішньою стільниковою структурою. Стільникові комірки створюють менше навантаження на керамічну оболонку та викликають менші деформації керамічної форми через тенденцію згортатися всередину під час випалювання моделі [9]. Окрім того, ця структура забезпечує мінімальне утворення твердого залишку при випалюванні та дозволяє економічно використовувати полімер при виготовленні моделі.

Міцність керамічних форм, а тому і стійкість до розтріскування при видаленні моделей, залежить від кількості шарів кераміки. В роботі [10] повідомляється, що при виготовленні керамічних оболонкових форм за моделями з ABS-пластику при нанесенні 5 шарів кераміки форми розтріскувалися при видаленні моделей. При нанесенні 6 і більше шарів кераміки фор-

ми залишалися цілими.

Очевидно, що на формування якості керамічної форми, а відповідно і вилівка, впливає не тільки матеріал разової моделі, та як вона надрукована, а й метод видалення пластику з форми. Кожний матеріал має різні температури плавлення і газифікації та потребує встановлення відповідних температурних областей для оптимального його видалення з керамічних форм. Технологія 3D-друку має безліч технологічних параметрів, які впливають на якість моделей, і відповідно на якість виливків, а тому потребують оптимізації параметрів процесу виготовлення моделей. Постає необхідність у виборі матеріалів, які б забезпечували баланс між вартістю, якістю та екологічністю, розробці схем одержання керамічних форм, в тому числі і для лиття тонкостінних складнопрофільних виробів, які б забезпечували необхідний рівень якості виливків та їх розмірної точності.

Проте, основним недоліком виготовлення виливків таким способом є розтріскування керамічних оболонок форм під час термічного видалення (випалювання) моделей внаслідок термічного розширення матеріалу моделей та неконтрольованого тиску газів під час їх газифікації.

Тому метою роботи була розробка методів видалення разових пластикових моделей з керамічних форм, підбір пластиків і оптимальних термокінетичних режимів їх видалення, що запобігатимуть утворенню тріщин в кераміці.

В рамках даної роботи було попередньо відібрано та досліджено зразки разових моделей, виготовлені методом 3D-друку, з доступних пластиків: PLA (полілактид), ABS (акрилонітрілбутадієнстірол), PC (полікарбонат), PET (поліетилентерефталат), Co-PET (ко-поліетилентерефталат), а також поліаміду PA-12 та фотополімеру. При виборі матеріалів 3D-друкованих моделей враховували такі характеристики, як розмірна точність, чистота поверхні, зольність, коефіцієнт термічного розширення при випалюванні, міцність, усадка та вартість. Моделі зразків виготовлялися у формі циліндрів (Ø15x60 мм) та призм (20x5x60 мм). Зразки з пластиків PLA, ABS, PC, PET, Co-PET були надруковані на 3D-принтері KLEMA 250 з робочою областю друку 250 x 250 x 350 мм методом пошарового наплавлення FDM (Fused Deposition Modeling) з 15 %-м заповненням моделей. Зразки з поліаміду PA-12 друкували за технологією Poly Jet, а зразки з фотополімеру — методом SLA.

На поверхні моделей, виготовлених FDM друком, візуально спостерігалися сліди пошарового наплавлення пластику. Найкращу якість поверхні мали зразки з поліаміду PA-12 та фотополімеру, що обумовлено технологіями їх друку, які на порядок є дорожчими за FDM друк. Встановлено, що найкращу розмірну точність та низьку усадку мали зразки з PLA пластику. Моделі характеризувалися високою деталізацією елементів та не мали відхилень від допусків на розміри. Пошкоджень, тріщин та явних ознак усадки моделей не виявлено.

Для проведення лабораторних випробувань була виготовлена партія керамічних оболонок за даними моделями (рис. 1). Вогнетривку суспензію готували із мікропорошків електрокорунду різних фракцій та гідролізованого етилсилікату 40 (ТУ-2435-427-057 63441-2004). Оболонкові зразки із 7 шарів кераміки одержували шляхом занурення моделей у вогнетривку суспензію з наступним присипанням зернистим електрокорундом і просушкою кожного шару.

Як показують результати роботи [11], на формування тріщин в керамічних формах істотно впливають швидкість нагрівання та час витримки їх в печі. Тому видалення пластикових моделей з керамічних форм було запропоновано проводити методом двоетапного випалювання в термічних печах, який попередньо був відпрацьований при випалюванні пінополістиролових моделей [12; 13].

Первинне випалювання виконували в камері лабораторної сушильної електрошафи СНОЛ 67/350 протягом 3 годин, метою якого було компактування, розм'якшення, часткове видалення і розкладання

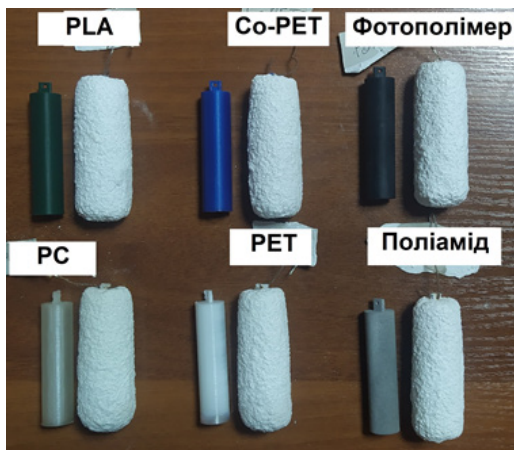


Рис. 1. Пластикові моделі та керамічні оболонкові зразки, що виготовлені за ними

матеріалу моделей. Керамічні зразки завантажували в електрошафу та поступово нагрівали від 20 до 350 °C зі швидкістю 100 °C/год. В даному діапазоні температур моделі з PLA пластику майже повністю газифікувалися з невеликим зольним залишком. Пластики PC, PET, Co-PET частково витоплювалися, не призводячи до розтріскування оболонок, тоді як моделі з ABS, поліаміду PA-12 та фотополімеру не витоплювалися, а викликали розтріскування керамічних оболонок внаслідок неконтрольованого тиску всередині форми та підвищеного термічного розши-

рення моделей вже при 150 °C (рис. 2). При цьому кераміка з ABS мала невеликі тріщини на поверхні, а керамічні зразки з поліамідом та фотополімером — суцільні тріщини, які викликали повне руйнування керамічних оболонок, що унеможливило їх подальше дослідження.

Високотемпературна фаза випалювання (2 етап) проводилася в електричній муфельній печі марки СНОЛ-2.4.2/12,5-ІІ1 (одночасно поєднувалася з процесом прожарювання оболонкової форми) за режимом: нагрівання до температури 1000—1100 °C зі швидкістю 150—200 °C/год і наступною витримкою протягом 2-х годин. В інтервалі температур 400—500 °C спостерігалось підвищене газовиділення. Високотемпературний етап випалювання дозволив повною мірою видалити з форми залишки модельних матеріалів PLA, PC, PET і Co-PET.

Тріщиноутворення у керамічних зразках під час їх нагрівання при випалюванні можна пояснити тим, що ливарна керамічна форма, в якій розташована пластикова модель, перешкоджає вільному виходу продуктів розкладання. Неконтрольований тиск газів та підвищене термічне розширення матеріалу моделей викликає напруження у кераміці. Якщо величина цих напружень перевищує міцність кераміки, то відбувається її деформація з утворенням тріщин або руйнування форми. В подальшому, для уникнення цих дефектів було скореговано процес виготовлення моделей, і на них були нанесені додаткові конструктивні елементи.

З урахуванням проведених досліджень, технологічних характеристик, а також екологічності та вартості для подальшого опробування на конкретних виливках було відібрано PLA пластик (полілактид). Він є одним з найбільш широко використовуваних термопластиків й повністю біорозкладним матеріалом, оскільки є полімером молочної кислоти. Сировиною для виробництва полілактиду служать кукурудза та цукровий очерет. Одним з найбільш важливих факторів для його застосування в 3D-друці є низька температура плавлення — всього 180—220 °C. PLA має густину 1240 кг/м³ та температуру кипіння 227 °C [14]. Пластик при випалюванні газифікується без виділення їдких речовин, тому для тонкостінних виливків складної конфігурації виготовлення разових моделей доцільно проводити методом 3D-друку саме з нього.

Ливарні моделі з різних матеріалів по-різному впливають на якість форми та, відповідно, на якість

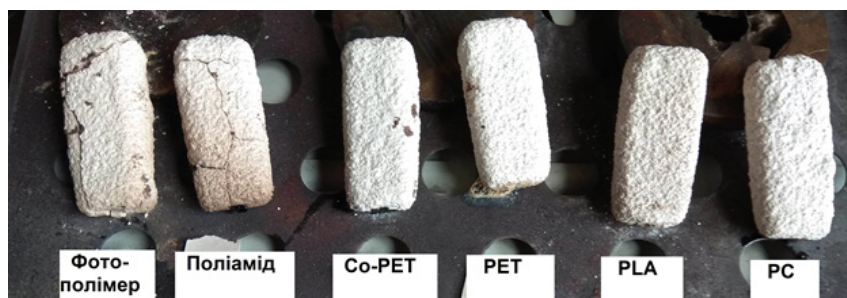


Рис. 2. Керамічні зразки з пластиковими моделями на початковому етапі випалювання (температура в печі — 150 °C)

поверхні майбутніх виливків. Так, наприклад, моделі з пінополістиролу мають комірчасту поверхню, яка негативно впливає на шорсткість поверхні виливків. Якість поверхні моделей, отриманих за допомогою адитивних технологій, залежить від типу матеріалу моделі та способу її виготовлення (метод пошарового наплавлення, лазерна стереолітографія або фотополімерний друк). Виливки отримані способом лиття за моделями, що випаляються, в основному, максимально точно відтворюють розміри деталі та мають задовільну чистоту поверхні. Проте, знаходження технологічних способів покращення якості поверхні моделей з різних матеріалів, а, відповідно, і якості поверхні форми є важливою задачею.

Усунення слідів пошарового синтезу пластикової моделі, утворених під час друку за FDM-технологією, можливе за рахунок нанесення тонкого шару воскоподібного матеріалу. Для забезпечення необхідної чистоти поверхні керамічної оболонки форми, а відповідно, і литої деталі, були випробувані два види покриттів: моделі зразків окунали у воскоподібну модельну масу «Велен 1» та 3 %-й розчин каніфолі в спирті. Для визначення оптимальної температури нанесення покриттів та необхідної кількості шарів покриття, моделі з PLA-пластику окунали в розплавлені покриття в діапазоні температур 60—85 °С з витримкою 5 хв для висихання. При цьому на поверхні моделей осідав шар покриття товщиною 0,5—1,0 мм, який забезпечував гарантований припуск на механічне оброблення деталей і знижував їх шорсткість.

Подальше опробування двоетапного процесу видалення пластикових моделей було проведено на партії оболонкових керамічних форм, призначених для виготовлення ендопротезів. Враховуючи попередні дослідження, моделі виливків ендопротезу «вертлюжної западини тазової кістки» (рис. 3, а) виготовляли з пластику PLA шляхом друку на 3D-принтері Klema 250. На пластикову модель були додані випори та промивники (рис. 3, б) з метою запобігання деформації та руйнування керамічних форм під час їх випалювання. Ці конструктивні елементи наносились перед виготовленням оболонки та були виконані з пінополістиролу та парафін-стеаринової суміші, тобто з матеріалів, що мають нижчу температуру плавлення за матеріал моделі. Аналогічно елементи ливникової

системи виготовляли з ливарного та екструдованого пінополістиролу для зменшення кількості матеріалу, витраченого для 3D-друку. Керамічні форми виготовляли за технологічними етапами сучасного способу лиття за моделями, що витоплюються (рис. 4), використовуючи суспензію на основі електрокорунду та етилсилікату.

Після висихання верхніх шарів керамічної форми з випарів видаляли кераміку, що значно полегшувало видалення пластику з ливарної порожнини. Видалення модельних матеріалів з форми проводили у два етапи. Спочатку форму поміщали в сушильну шафу, де при поступовому нагріві до 350 °С відбувалося випалювання пластику та часткова його газифікація та пінополістиролової ливникової системи.

Поверхневий огляд форм після низькотемпературного (до 350 °С) випалювання (рис. 5а, б) показує наявність зольного залишку PLA пластику та пінополістиролу на всій поверхні форми з найбільшим скупченням у зонах стикання. На керамічних формах не було виявлено руйнувань та тріщин. Застосування високотемпературного (до 1100 °С та наступною витримкою до 2-х годин) етапу випалювання моделей, проведеного в електричній муфельній печі марки СНОЛ-2.4.2/12,5-ІІ, дозволило в повній мірі видалити залишки модельного матеріалу (пластику та полістиролу) з форми (рис. 5б, 6) та забезпечити необхідну міцність керамічній оболонці внаслідок прожарювання. В інтервалі температур 400—500 °С спостерігалось підвищене газовиділення, тому випалювання виконували під витяжним зонтом.

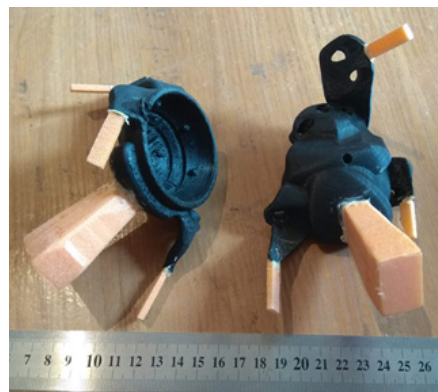
Після двоетапного термооброблення партії оболонкових керамічних форм було проведено їх заливання титановим сплавом в електронно-променевої ливарній установці ЕПЛУ-4, в результаті чого одержано виливки із задовільною якістю.

Висновки

На основі проведених експериментів визначено температурні області випалювання моделей із різних пластиків. Розроблено оптимальні з технологічної точки зору режими термічного видалення полімерних моделей з керамічних форм, а саме, двостадійне випалювання моделей в термічній печі. Використання низькотемпературного ета-



а



б

Рис. 3.

Модель ендопротезу, що виготовлена FDM-друком (а), моделі ендопротезу з випарами та живильниками (б)



Рис. 4. Керамічні форми, що виготовлені за пластиковими моделями ендопротезів

пу випалювання з поступовим нагріванням сприяє компактуванню, розм'якшенню, розплавленню та частковій газифікації матеріалу моделей, що, як результат, запобігає розтріскуванню керамічних форм. При високотемпературній фазі (1000—1100 °C) випалювання відбувається повне видалення продуктів деградації полімерних моделей та набуття керамічними оболонками міцності.

Застосування пластикових моделей (замість вос-



Рис. 6. Керамічні форми після низько- та високотемпературного випалювання

кових чи пінополістиролових) для виготовлення керамічних форм може покращити розмірну точність та якість поверхні металевих виливків та є економічно обґрунтованим для малосерійного виробництва. Розроблені методи видалення разових моделей можуть використовуватися для одержання унікальних одиничних металевих виробів, зокрема біомедичного призначення, литтям в керамічні форми.

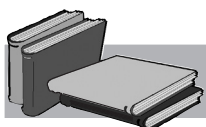


а



б

Рис. 5. Внутрішня поверхня керамічної форми після низькотемпературного (а) та високотемпературного (б) випалювання

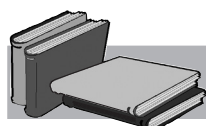


ЛІТЕРАТУРА

1. Лысенко Н.А., Педаш А.А., Клочихин В.В., Наумик В.В. Получение выжигаемых моделей методом 3D-принтинга для отливок газотурбинных двигателей. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2019. № 7(159). С. 128—133. <https://doi.org/10.32620/aktt.2019.7.18>
2. Marwah O.M.F., Shukri M.S., Mohamad E.J., Johar M.A., Haq R.H.A., Khiruddin R.K. Direct Investment Casting For Pattern Developed By Desktop 3D Printer. In *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 135. 00036. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713500036>
3. Singh S., Singh R. Fused deposition modelling based rapid patterns for investment casting applications: a review. *Rapid Prototyping Journal*. 2016. Vol. 22. No. 1. P. 123—143. <https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2014-0017>
4. Kumar P., Ahuja I.P.S., Singh R. Application of fusion deposition modelling for rapid investment casting — a review. *International Journal of Materials Engineering Innovation*. 2012. Vol. 3. No. 3—4. P. 204—227. <https://doi.org/10.1504/IJMATEI.2012.049254>
5. Marwah O.M.F., Sharif S., Zainol M.A., Ibrahim M., Mohamad E.J. 3D printer patterns evaluation for direct investment casting. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vols. 465—466. P. 1400—1403. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.465-466.1400>

6. Wang S., Miranda A.G., Shih C. A study of investment casting with plastic patterns. *Materials and Manufacturing Processes*. 2010. Vol. 25. Iss. 12. P. 1482—1488. <https://doi.org/10.1080/10426914.2010.529585>
7. Idris M.H., Sharif S., Harun W.S.W. Evaluation of ABS patterns produced from FDM for investment casting process. In *Proceedings of the 9th Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference*, 2008. P. 3—5.
8. 3D Printing for Investment Casting. URL: <https://www.uniontech3d.com/3d-printing-investment-casting.html> (дата звернення: 10.08.2023).
9. Shukri M.S., Marwah O.M.F., Ibrahim M., Sharif S., Mohamad E.J. An experimental analysis of strain and stress for ABS pattern developed by portable FDM machine used in direct investment casting. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016. Vol. 11. No. 10. P. 6496—6501.
10. Singh, R., Singh, G. Cast Component Hardness Comparison for Investment Casting Prepared with Wax and ABS Patterns. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2015. Vol. 68. P. 17—21. <https://doi.org/10.1007/s12666-014-0432-5>
11. Soemardi T.P., Suwandi A., Kiswanto G., Kusumaningsih W. The Effect of Temperature Increase, Holding Time and Number of Layers on Ceramic Shells using the Investment Casting Process. *International Journal of Technology*. 2016. Vol. 7. No. 6. P. 1035—1044. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v7i6.3354>
12. Максютя И.И., Квасницкая Ю.Г., Нейма А.В., Михнян Е.В., Тихонова О.А. Выжигаемые ППС-модели как перспективный метод улучшения качества литых деталей ГТД. *Процессы литья*. 2015. № 3. С. 47—56.
13. Лашнева В.В., Максютя И.И., Квасницкая Ю.Г., Нейма А.В., Михнян Е.В. Использование корундовых форм с выжигаемыми моделями для получения деталей газотурбинных установок. *Современные проблемы физического материаловедения*. 2015. Вып. 24. С. 53—60.
14. Калужний П.Б., Дорошенко В.С., Нейма О.В. Лиття за комбінованими полімерними моделями, що газифікуються. *Процеси литья*. 2023. № 2(152). С. 49—55. <https://doi.org/10.15407/plit2023.02.049>

Надійшла 14.08.2023



REFERENCES

1. Lysenko, N.A., Pedash, A.A., Klochikhin, V.V., Naumik, V.V. (2019). Production of FDM-patterns via 3D-printing for turbine castings. *Aerospace engineering and technology*, 7(159), 128—133. <https://doi.org/10.32620/akt.2019.7.18> [in Russian].
2. Marwah, O.M.F., Shukri, M.S., Mohamad, E.J., Johar, M.A., Haq, R.H.A., Khiroutdin, R.K. (2017). Direct Investment Casting For Pattern Developed By Desktop 3D Printer. In *MATEC Web of Conferences*, 135, 00036. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713500036>
3. Singh, S., Singh, R. (2016). Fused deposition modelling based rapid patterns for investment casting applications: a review. *Rapid Prototyping Journal*, 22(1), 123—143. <https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2014-0017>
4. Kumar, P., Ahuja, I.P.S., Singh, R. (2012). Application of fusion deposition modelling for rapid investment casting — a review. *International Journal of Materials Engineering Innovation*, 3(3—4), 204—227. <https://doi.org/10.1504/IJMATEI.2012.049254>
5. Marwah, O.M.F., Sharif, S., Zainol, M.A., Ibrahim, M., Mohamad, E.J. (2010). 3D printer patterns evaluation for direct investment casting. *Applied Mechanics and Materials*, (465—466), 1400—1403. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.465-466.1400>
6. Wang, S., Miranda, A.G., Shih, C. (2010). A study of investment casting with plastic patterns. *Materials and Manufacturing Processes*, 25(12), 1482—1488. <https://doi.org/10.1080/10426914.2010.529585>
7. Idris, M.H., Sharif, S., Harun, W.S.W. (2008). Evaluation of ABS patterns produced from FDM for investment casting process. In *Proceedings of the 9th Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference*, pp. 3—5.
8. 3D Printing for Investment Casting. URL: <https://www.uniontech3d.com/3d-printing-investment-casting.html> (last accessed: 10.08.2023).
9. Shukri, M.S., Marwah, O.M.F., Ibrahim, M., Sharif, S., Mohamad, E.J. (2016). An Experimental Analysis of Strain and Stress for ABS Pattern Developed by Portable FDM Machine Used in Direct Investment Casting. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(10), 6496—6501.
10. Singh, R., Singh, G. (2015). Cast Component Hardness Comparison for Investment Casting Prepared with Wax and ABS Patterns. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 68, 17—21. <https://doi.org/10.1007/s12666-014-0432-5>
11. Soemardi, T.P., Suwandi, A., Kiswanto, G., Kusumaningsih, W. (2016). The effect of Temperature Increase, Holding Time and Number of Layers on Ceramic Shells using the Investment Casting Process. *International Journal of Technology*, 7(6), 1035—1044. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v7i6.3354>
12. Maksyuta, I.I., Kvasnitskaia, Yu.H., Neima, A.V., Mikhnyan, E.V., Tihonova, O.A. (2015). The polystyrene foam models that burned as a promising method for improving the quality of cast parts GTE. *Casting processes*, 3, 47—56 [in Russian].
13. Lashnieva, V.V., Maksyuta, I.I., Kvasnitskaia, Yu.H., Neima, A.V., Mikhnyan, E.V. (2015). The using corundum forms with burns of models for obtaining GTE parts. *Modern problems of physical materials*, 24, 53—60 [in Russian].
14. Kaliuzhnyi, P.B., Doroshenko, V.S., Neima, O.V. (2023). Casting of combined polymer patterns that are gasified. *Casting processes*, 2(152), 49—55. <https://doi.org/10.15407/plit2023.02.049> [in Ukrainian].

Received 14.08.2023

Summary

O.V. Neima, Junior Researcher, e-mail: neima_alex@ukr.net,
<https://orcid.org/0000-0001-5438-7253>

O.Y. Shinsky, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Department, e-mail:
aluprt@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6200-0709>

P.B. Kaliuzhnyi, PhD (Engin.), Deputy Director,
e-mail: kpb.ptima@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1111-4826>

O.V. Mikhnyan, PhD (Engin.), Senior Researcher,
e-mail: mixnyan@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-3210-4173>

*Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine
(Kyiv, Ukraine)*

Development of removal modes of 3D-printed polymer patterns from ceramic molds

The use of additive technologies, particularly 3D printing, to make patterns instead of traditional wax patterns is promising for casting into ceramic molds. However, when using polymer patterns, there is a problem of cracking ceramic shells during their firing. The goal of the work was to develop optimal thermo-kinetic modes of removal of disposable plastic patterns from ceramic molds, which will prevent the formation of cracks in ceramics. During the study, samples of patterns made by 3D printing from various plastics were selected and examined. Laboratory tests were carried out on a batch of ceramic shells made of electrocorundum. The methods of removing plastic patterns from ceramic molds by means of two-stage firing in thermal furnaces were investigated. The low-temperature stage of firing consisted in gradually heating the ceramics up to 350 °C. During it, the material of the patterns was compacted, softened, melted, and partially gasified. This reduced uncontrolled gas pressure and stress in the ceramic and prevented the formation of cracks in it. The high-temperature firing phase (1000–1100 °C) was performed for sintering ceramics and removing the remains of plastic materials. The influence of different plastic materials on the quality of the casting mold was investigated. It is proposed to use PLA plastic for the 3D printing of patterns, as it meets the requirements of environmental friendliness and cost. The possibility of improving the surface quality of ceramic shells by coating them with a thin layer of wax-like material is also considered. According to the results of research on the surface of ceramic forms, it is proposed to add structural elements to plastic patterns that reduce deformations of ceramic forms during firing. The developed firing modes of the patterns are used in the production of ceramic molds for endoprostheses.

Keywords

Polymer pattern, 3D printing, investment casting, ceramic mold, firing, cracking.