

<https://doi.org/10.15407/plit2025.01.022>

УДК: 621.747.53

К.Г. Квасницька, аспірант; e-mail: katonish@gmail.com;

<https://orcid.org/0000-0001-8712-9285>

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

ШЛЯХИ УСУНЕННЯ НЕДОЛІКІВ ТЕХНОЛОГІЇ ЛИТТЯ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

Із розвитком української промисловості газотурбобудування все більше вдосконалюються конструкції газотурбінних двигунів і установок. Однак це призводить до ускладнення конструкцій лопаток, які є важливою складовою цих систем. Постає завдання покращити ефективність процесу виробництва литих лопаток, забезпечивши високу якість виробу. Дослідження в цій галузі показують, що більшість наукових робіт, пов'язаних із литтям лопаток газотурбінних двигунів, зосереджена на розробці нових сплавів. Проте керамічні ливарні форми отримують недостатньо уваги, хоч мають значний вплив на властивості, геометрію і якість виготовлених лопаток. Незважаючи на тривалий досвід українських турбобудівних підприємств, виробництво литих лопаток є недосконалим, і відсоток браку залишається доволі високим, іноді досягаючи 60 %. Найбільший відсоток браку (до 40 %) пояснюється наявністю дефектів, таких як різностінність, термічні тріщини та жолоблення стрижнів. Ці дефекти виникають на етапі отримання керамічних форм через недосконалість використовуваних модельних мас, формувальних матеріалів і стрижневої системи. Як наслідок, підприємства зазнають великих виробничих втрат, тому розробка заходів для зменшення відсотка браку стає актуальною та необхідною. Необхідно розробити заходи, спрямовані на розв'язання цієї проблеми і зниження відсотка браку. Це може включати в себе дослідження та впровадження нових модельних мас, формувальних матеріалів і стрижневої системи, які будуть максимально точними і надійними. Також важливо провести аналіз і вдосконалення процесів формування керамічних форм, щоб усунути їх недосконалості, які призводять до дефектів у литих лопатках.

Ключові слова: ливарне виробництво, розплав, керамічна форма, виливок, міцність, модифікування.

Найкритичнішими елементами високотемпературних турбін у сучасному газотурбобудуванні є робочі та направляючі лопатки. Для їх виготовлення використовують жароміцні сплави на основі нікелю, застосовуючи метод точного лиття за моделями, що витоплюються. Для лиття робочих лопаток ГТД використовують вакуумні плавильні установки з підігрівом форм різних типів.

Виготовлення таких складних елементів газотурбінного двигуна, як робочі лопатки, є важким технологічним процесом через їх складну геометрію. Необхідно контролювати багато критичних поверхонь та досягати високої точності геометричних параметрів деталей на рівні 5–7 квалітетів. Крім того, шорсткість поверхні повинна бути не більше 1,25 мкм. Основними чинниками якості таких складнопрофільних деталей є вибір оптимального технологічного процесу виплавлення лопаток і підбір керамічних матеріалів для форм, стрижнів і фільтрів, які б забезпечили отримання

Проблеми технології форми

виливків високої геометричної точності. Відзначимо, що вогнетривкі матеріали для отримання лопаток з орієнтованою (спрямованою або монокристалічною) структурою повинні витримувати значно триваліший контакт із розплавом перегрітого металу, порівняно з виробами, призначеними для деталей із полікристалічною рівноосною структурою (рис. 1).

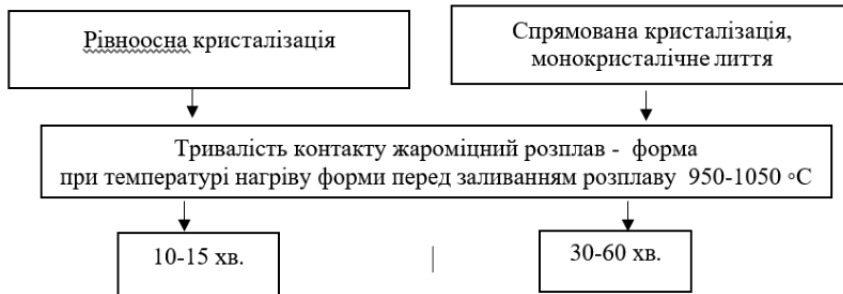


Рис. 1. Порівняння контакту жароміцний розплав-форма в залежності від способу кристалізації

На основі вивчення наукової та патентної літератури, а також даних вітчизняних підприємств газотурбобудування, досвіду роботи наукових підрозділів ФТМС НАН України дозволяє сформулювати загальні й спеціальні вимоги до вогнетривів, матеріалів для виготовлення формувальних сумішей, стрижнів для деталей із жароміцних сплавів як із рівноосною, так і з орієнтованою структурою [1–11].

Для створення керамічних форм використовуються вогнетривкі матеріали, що мають зернисту або пиловидну структуру, а також рідке в'язуче. Сьогодні найпоширенішими є тугоплавкі оксиди металів та їх сполуки, що застосовуються як матеріали для керамічних форм [2].

Вогнетривкі матеріали мають відповідати таким критеріям: хімічна інертність стосовно рідкого металу і спричинений цим мінімальний вміст шкідливих домішок, насамперед лужних і лужноземельних металів, оксидів заліза тощо; відсутність об'ємних змін при нагріванні внаслідок перекристалізації матеріалу; коефіцієнт лінійного термічного розширення не більше $5 \div 6 \times 10^{-6}$ мм/град. (рис. 2) [3]; однорідність матеріалу за конфігурацією (сферична форма частинок) і за хіміскладом (з масовою часткою 98–99 % вихідного продукту); забезпечення міцності керамічних форм (при згинанні) при температурах 50–1000 °C не менше 55–60 кг/см².

Сполучні матеріали: стабільність за складом вихідних матеріалів; стабільність за властивостями вогнетривкої суспензії обсягом до 2000 м³; централізоване виготовлення та постачання готового сполучного; час приготування суспензії не більше однієї години на електрокорунді та плавленому кварці; час сушіння

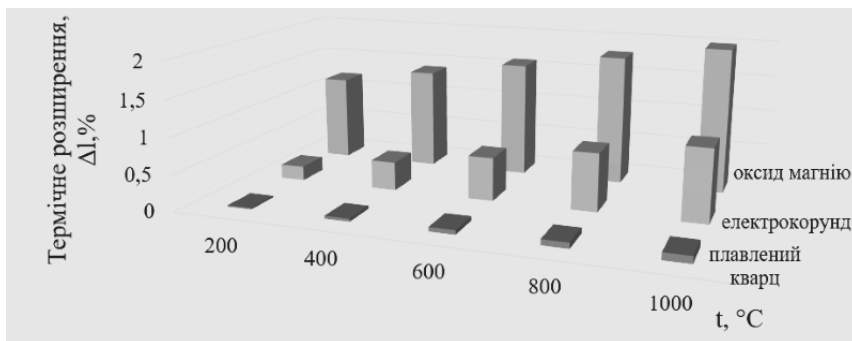


Рис. 2. Температурна залежність коефіцієнта лінійного термічного розширення щодо різних видів вогнетривів [3]

вогнетривкого покриття (14–16 шарів) – трохи більше 10 год; можливість контролю якості сполучного матеріалу суспензії та вогнетривкого покриття; забезпечення міцності керамічних форм / при згинанні / при температурах 950–1000 °С не менше 55–60 кг/см²; збереження геометрії ливарної форми при видаленні модельного складу (у воді, при випалюванні), прожарюванні та заливанні металом до температури 1750–1800 °С; хороша змочуваність суспензією модельного матеріалу, відсутність взаємодії із жароміцними сплавами.

У цілому, для отримання виробів високої якості керамічна оболонкова форма повинна:

- мати достатню міцність, щоб витримувати динамічні й статичні навантаження під час процесу заливки, твердіння та охолодження виливки;
- бути хімічно інертною до модельної маси та матеріалу виливки, щоб уникнути реакцій із зміною складу матеріалу; мати достатню піддатливість, щоб не заважати усадці сплаву під час твердіння;
- забезпечувати отримання виливків з необхідною шорсткістю поверхні, точністю розмірів та формою.

Ці вимоги є важливими для забезпечення високої якості і точності литих деталей, зокрема робочих лопаток ГТД. Керамічна форма повинна мати властивості, що дозволяють зберігати свою структуру та форму під час процесу лиття, забезпечуючи отримання деталей із потрібними характеристиками та геометрією [1–6].

Багато авторів приділяють увагу створенні нового складу наповнювача для керамічної форми [12–14]. Так, автори [13] проводили дослідження жароміцних сплавів із різним вмістом Y , які отримували методом спрямованої кристалізації за допомогою керамічних форм із шаром Y_2O_3 . Обговорено механізми взаємодії жароміцних сплавів із шаром Y_2O_3 . Було виявлено, що шар Y_2O_3 ефективно перешкоджає реакції прямого контакту між активним розплавом і керамікою Al_2O_3 , що сприяло підвищенню чистоти розплаву та зменшенню втрат Y .

Автори [14] виготовили керамічні оболонкові форми для лиття за виплавлюваними моделями лопаток турбін низького тиску з використанням сполучного колоїдного кремнезему та часткової заміни цирконового наповнювача тонким оксидом алюмінію. Серед двох розроблених керамічних суспензійних систем перша суспензійна система складалася з безполімерного колоїдного кремнезему, а друга суспензійна система складалася з полімервмісного колоїдного кремнезему. Зразки, виготовлені з першої суспензії, показали вищі значення залишкової міцності під час випалу та самонавантаження (менший опір провисанню). Лиття лопаток авіаційного призначення з кожухом проводилося при 1525 °С і 1550 °С з використанням суперсплаву CM247LC. Керамічні оболонкові форми, виготовлені з другої суспензійної системи, що містить 30 мас. % тонкодисперсного наповнювача оксиду алюмінію, дали аеронавігаційне лиття (при 1550 °С) лопаток з необхідною точністю розмірів та середньою шорсткістю поверхні. Такий процес одержання керамічних форм оправдано для лиття авіаційних лопаток, але для лопаток ГТД енергетичного призначення занадто складний.

Для покращення властивостей кремнієвої золевої оболонки для процесу лиття за виплавлюваними моделями, автори [15] в суспензію для приготування армованої волокном оболонки додавали різний вміст гібридних волокон (силікат алюмінію та поліпропілен). Максимальна міцність на вигин 4,96 МПа була отримана в обпаленій оболонці з додаванням 0,6 % мас. гібридних волокон. Високотемпературна самонавантажена деформація зразків оболонок, армованих із додаванням гібридного волокна понад 0,6 % мас., вища, ніж у неармованих. Автори [16] застосували ефективний процес змішування для рівномірного розподілу гібридних волокон при виготовленні модифікованої кремнеземної оболонки з вуглецевих нейлонових волокон з підвищеною міцністю на вигин і теплопередачею. Керамічні оболонки, модифіковані вуглецево-нейлоновими гібридними волокнами, спечені у вакуумі. Оболонка, модифікована гібридними волокнами щільністю 4 г/л, демонструє

підвищену міцність у невитриманому стані 4,2 МПа та міцність при спіканні 5,46 МПа. Оболонка показала посилення тепловіддачі з додаванням гібридних волокон. Але для лиття складнопрофільних деталей турбіни ГТД вище заявлена міцність [14, 15] керамічної форми недостатня.

На вітчизняних підприємствах-виробниках газотурбінних двигунів виготовлення керамічних оболонкових форм виконують так. Для виготовлення шарів керамічної форми на модельні блоки наносять вогнетривкі суспензії, використовуючи спиртовий розчин ГРЕТС марки ЕТС-40. Пилоподібний наповнювач вогнетривкої суспензії — дистенсиліманіт або електрокорунд білий. Для поверхневого модифікування виливків із жароміцних нікелевих сплавів у вогнетривку суспензію лицьового шару вводять 2...7 % (за масою) порошкоподібного алюмінату кобальту. Для обсіпання шарів модельних блоків використовують крупнозернисті фракції електрокорунду білого або крихту високоглиноземистого шамоту. Сушіння покриття на модельних блоках здійснюють у вакуумі, вакуумно-аміачному або повітряно-аміачному газовому середовищі або на повітрі. Після сушіння на модельному блоці останнього шару вогнетривкого покриття його витримують на повітрі протягом доби і в бойлерклаві здійснюють виплавлення з нього воскової моделі. Отримані керамічні форми готують під заливку, яка включає їх нагрівання і прожарювання при температурі 950...1050 °С протягом 2...5 год., вакуумують та заливають металом. В окремих випадках великогабаритні керамічні оболонкові форми піддають подвійному прожарюванню. Тобто форми прожарюють при температурі 760 °С або 960 °С, охолоджують, промивають водою, просушують, повторно нагрівають до 950... 980 °С і встановлюють в електрообігріваний муфель вакуумної плавильно-заливальної установки, де формують в опорний наповнювач — крихту шамотну або уламки кераміки. Після прожарювання при 950...980 °С протягом 12...24 год форми переносять до вакуумної плавильно-заливальної установки, де через 20...40 хв в умовах вакууму заливають металом [1].

Як було зазначено вище, плавку і заливку в керамічні оболонкові форми проводять у вакуумних плавильно-заливальних установках. Для виплавки жароміцних нікелевих сплавів як шихту використовують мірні заготовки із суворо регламентованим хімічним складом. Заливку розплавом у форму здійснюють безпосередньо з плавильного тигля установки, після чого її охолоджують на відкритому повітрі або перед цим її на 2...3 год поміщають до термостату з температурою 650...750 °С.

Після теоретичних досліджень та розрахунків, у тому числі термодинамічних характеристик, використання методів математичного моделювання, великого комплексу випробувань фізико-механічних характеристик вогнетривів науковці ФТІМС НАН України запропонували та випробували модифікування наявних вогнетривких і формувальних композицій дрібнодисперсними порошками елементів Періодичної системи Менделєєва: алюмінієм, кремнієм, бором, тобто введення до керамічної суміші модифікаторів. Ці модифіковані суміші були захищені численними патентами та успішно випробувані на підприємствах газотурбобудування України [17–22].

Муліт формується після додавання порошкоподібного алюмінію як модифікатора до складу, який окислюється, утворюючи оксид алюмінію. Під час спікання цієї суміші Al_2O_3 взаємодіє з кремнеземом (SiO_2), що призводить до утворення муліту. При цьому відбувається зміна кристалічної структури компонентів. Додавання порошку алюмінію в суміші у кількості від 3 до 10 % мас. підвищує міцність кераміки на згин приблизно на 15–33 % при будь-яких температурах спікання. При цьому міцність кераміки на стиск збільшується на 20–42 %, а температура початку деформації підвищується на 50–70 °С. Температура спікання цього типу кераміки прискорює перехід оксидів алюмінію з модифікації $\gamma-Al_2O_3$ (основна модифікація оксидів, що змінюється при температурі вище 1000 °С) в корунд $\alpha-Al_2O_3$. Це спричинює утворення більшої кількості зміцнюючої фази у складі вогнетривкої суміші, а саме корунду, що підвищує термомеханічні властивості кераміки. [19–23].

Керамічні оболонкові форми, виготовлені за традиційною технологією, мають відносно низьку міцність і часто тріскаються в процесі лиття. Крім того, традиційний

процес виготовлення форм вимагає тривалого часу та високих витрат. У роботі [24] мулітові керамічні оболонкові форми з підвищеною міцністю були виготовлені шляхом селективного лазерного спікання у поєднанні з процесом високотемпературного спікання. Було досліджено вплив параметрів процесу селективного лазерного спікання на розміри. Рентгеноструктурний аналіз і скануюча електронна мікроскопія показали, що на поведінку мулітизації впливає температура спікання. Крім того, вміст мулітової фази, розміри зерен муліту та середнє відношення довжини до діаметра зерен муліту збільшувалися зі збільшенням температури спікання.

У процесі створення ливарних форм використовуються тугоплавкі оксиди як в'язучі матеріали, що утворюються з органічних сполук або неорганічних солей металів та цементуючої основи під час формування оболонки [25–29]. Для виготовлення ливарних форм використовуються суміші, до складу яких входить неорганічна кислота (H_2SO_4), а також HCl при потребі для посилення гідролізу) в кількості 0,25–0,4 % мас., що застосовується як каталізатор гідролізу етилсилікату [18]. Зокрема, використовуються етилсилікати марок 32 та 40, що складаються із суміші тетраетоксиласану й алкоксиласанів, а також рідше — етилсилікат 50 [28]. У цих матеріалах відбувається процес гідролітичної поліконденсації при взаємодії з водою, що призводить до утворення розгалужених та зшитих молекул з упорядкованою структурою. Спочатку утворюється розчин кремнієвої кислоти (колоїдний розчин), який використовується для виготовлення покриття. Після сушіння розчин переходить у гель, який покриває та зчеплює частинки наповнювача.

У промисловості для розчинення етилсилікату використовують етиловий спирт та ацетон. Це зумовлено тим, що етилсилікат не змочується водою і не розчиняється в ній. Процес гідролізу етилсилікату зазвичай проводять, змішуючи його з розчинником і додаванням кислоти. Для перших двох стадій гідролізу використовують масову частку до 25 % загального об'єму складових, на третій стадії — 50 % мас. Однак ця кількість не стосується соляної кислоти, яка додається разом із водою на першій стадії гідролізу.

Важливим фактором у підвищенні та стабілізації точності параметрів воскової моделі і, відповідно, вилівка є склад матеріалу воскової моделі. Сьогодні при розробці модельної маси оптимізацію її складу проводять за показником лінійної усадки й теплостійкості воскової моделі, плинності модельної маси в пастоподібному стані, рідкоплинності, межі міцності на вигин при 20 °C та вартості з подальшим визначенням у розроблених модельних мас коефіцієнту термічного лінійного розширення матеріалу та інших величин [28, 29].

Для розробки нових конструкцій або вдосконалення газотурбінних двигунів необхідно виготовляти дослідні партії лопаток, що зараз займає від 6 місяців до 1 року через тривалий процес виготовлення оснащення (розробка, креслення, виготовлення прес-форм). Однак при малій серійності його застосування недоцільне через високу вартість оснащення для виготовлення моделей. Тому актуальною є розробка нових рішень, які б дозволяли зменшити виробничі витрати та підвищити ресурсоефективність технології лиття за моделями, що витоплюються. Ефективне розв'язання цієї проблеми — використання адитивних технологій для створення разових моделей замість воскових. Суть адитивного виробництва полягає в створенні CAD-моделі з подальшим виготовленням разової моделі за допомогою технології 3D-друку.

3D-друк значно скорочує тривалість процесу від задуму або креслення до готового виробу, одночасно зменшуючи трудомісткість, матеріалоемність і енергоемність виробництва. Таким чином, адитивне виробництво дозволяє створювати кінцеві функціональні вироби безпосередньо від конструктора або інженера за допомогою комп'ютера і принтера, усуваючи необхідність додаткових технологічних операцій [30–33].

3D-друк моделей виливків усуне потребу залучення цілої низки металообробних верстатів і скоротить технологічний цикл виготовлення складнопрофільних виливків

відповідального призначення. 3D-друк дозволяє виготовляти деталі з великою точністю, яка може досягати 70 мкм, тому оболонкові керамічні форми, виготовлені за допомогою 3D-технологій, дозволять одержувати найточніші ливарні металовироби з високою якістю поверхні порівняно з іншими технологіями.

Актуальним є також питання екологічності процесів, зокрема при виготовленні керамічних форм. Наразі як сполучна речовина використовується етилсилікат, але його виготовлення вимагає використання органічних розчинників, що є вибухо- і пожежонебезпечними, як-от ацетон або етиловий спирт.

Наприклад, автори [34] провели механічні та кінетичні дослідження керамічної форми з вогнетривкого плавного кремнезему, виготовленої шляхом адитивного виробництва. Керамічна форма була виготовлена за допомогою керамічної стереолітографії адитивного виробництва. Вогнетривкі керамічні форми повинні задовольняти такі вимоги, як подібна міцність до литого металу під час затвердіння, термічна стабільність для точності розмірів і легке видалення серцевини після лиття. За дослідженнями авторів [34], міцність на вигин спеченого кремнезему постійно зростає з вищою щільністю та кращим ущільненням до 11,4 МПа при 1300 °С, тоді як вона зменшується з 11,3 МПа при 1350 °С до 4,6 МПа при 1500 °С. Зменшення міцності на вигин пов'язане з більшою кількістю кристобаліту та мікротріщин, утворених різким скороченням, спричиненим під час перетворення бета-кристобаліту в альфа-кристобаліт. Враховуючи кількісне рентгенівське дифракційне дослідження кінетики перетворення, уявна енергія активації Q становить 674 ± 53 кДж/моль, а середній показник часу — 1,85, що свідчить про те, що кінетика перетворення контролюється 1-вимірним міжфазним зростанням. Тобто виготовлення керамічних оболонкових форм за разовими моделями із пластику потребує подальших досліджень.

Зауважимо, що точність виливків у литті за моделями, що витоплюються, перебуває в прямій залежності від міцності й термостійкості керамічної оболонкової форми, зі збільшенням яких зменшуються величини її деформацій і, відповідно, відхилень розмірів виливки від їх номінальних значень. Розглядаючи це питання, зазначимо, що заміна матеріалу форми, так само як і способу отримання виливків, як і заміна використовуваного сплаву в технологічному циклі виробництва виливків є одним із факторів виникнення випадкових та систематичних похибок розмірної точності виливків. Ця закономірність зумовлена переважно різницею величини коефіцієнтів термічного розширення матеріалів керамічної оболонкової форми, їхніми фізико-хімічними властивостями, пористістю керамічної форми тощо. Тобто, використовуючи ті чи інші сполучні та вогнетривкі матеріали для виготовлення керамічної форми, технологію та параметри виготовлення керамічної форми можна певною мірою керувати рівнем і стабільністю розмірної точності виливків [1].

У підприємствах газотурбобудування України, таких як ВАТ «Мотор Січ», ДП ЗМКБ «Прогрес» у м. Запоріжжя і ДП НВКГ «Зоря-Машпроект» у м. Миколаїв, для виготовлення охолоджуваних лопаток газотурбінних двигунів із високотемпературних сплавів зазвичай використовують керамічні стрижні на основі корунду та плавного кварцу [35].

Незважаючи на значні досягнення у технології виготовлення таких лопаток, відсоток браку є великим. Аналіз показує, що до 40 % браку припадає на різностінність, термічні тріщини та жолоблення стрижнів, які виникають під час повторного прожарювання в процесі виготовлення й отримання виливків [36, 37]. На рис. 3 показано аналіз видів браку суто для охолоджуваних лопаток ГТД. Кількість браку наведена у % від загального числа виливків у партії [38].

Важливим аспектом під час виготовлення стрижня є можливість його видалення з виливка [39]. У випадку видалення стрижнів на основі корунду з лопаток, які мають складну систему внутрішніх каналів, воно можливе лише за допомогою хімічного методу з використанням фториду калію. Проте цей процес шкідливим та небезпечним в плані екології.

Для поліпшення виходу придатних виробів литва охолоджувальних лопаток ГТД

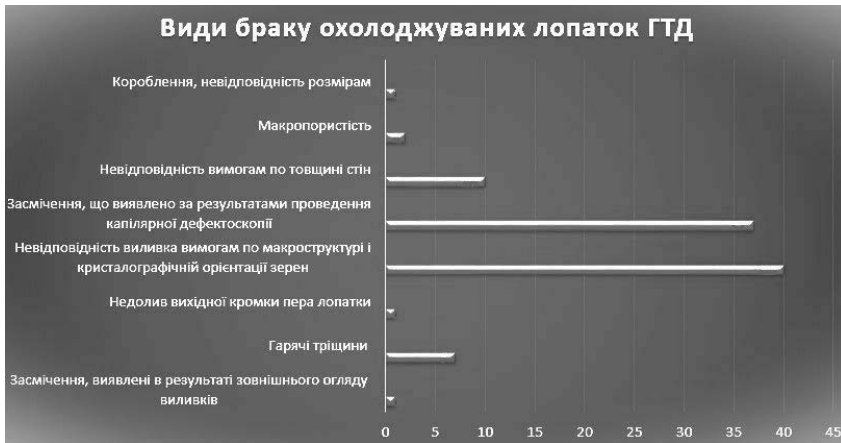


Рис. 3. Види браку охолоджуваних лопаток ГТД, % [38]

необхідно отримати внутрішні поверхні лопаток із мінімальним опором для руху робочого середовища, уникнути наявності водню під час видалення кераміки та усунути шкідливі фторовмісні компоненти.

Висновки

Засновуючись на виявлених вище недоліках та з метою вдосконалення технології лиття деталей можна запропонувати такі рішення та розробки:

- екологічно чисті сполучні речовини на водній основі для виготовлення керамічних форм зі збереженням технологічних характеристик, що не поступаються етилсилікатним сполучним матеріалам;
- нові склади модельних мас та технології виготовлення разових моделей робочих та направляючих лопаток ГТД;
- використання полімерних матеріалів і технологій адитивного виготовлення для створення разових моделей лопаток;
- оптимальні режими видалення моделей із керамічних форм;
- вивчення механізму взаємодії в системі розплав-оксид-сполучне на границі метал-форма при тривалій взаємодії;
- автоклавна технологія видалення залишків кераміки з виливків, яка замінить екологічно шкідливе і дороге хімічне травлення у фториді калію;
- розробка технологічних схем виготовлення керамічних форм із використанням сполучних речовин на водній основі та запропонованих модельних матеріалів для отримання литих деталей ГТД.

Також варто розглянути можливість використання сучасних технологій, таких як комп'ютерне моделювання та 3D-друк для розв'язання проблеми браку в ливарному виробництві. Ці технології можуть забезпечити більш точну реплікацію форм і зменшити ризик появи дефектів.

Усі ці рішення та розробки спрямовані на подолання екологічних проблем, покращення якості та ефективності процесів виготовлення лопаток ГТД.

Список літератури

- 1 Репях С.И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям. Днепропетровск: Лира ЛТД, 2006.
- 2 Greskovich C.D. Method for making investment casting molds for casting superalloys (Patent No. 4026344). 2007.
- 3 Куренкова О.А. (1998). Водные этилсилікатные связующие в литье по выплавляемым моделям. *Сборник тезисов докладов Всероссийской молодежной конференции*. Т. 4. 1, С. 93–94. *Литье по выплавляемым моделям* / В.Н. Иванов, С.А. Казёнов, Б.С. Курчман и др.; под общ. ред. Я.И. Шкленника, В.А. Озерова. 3-изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 1984. 408 с.

- 4 Литьє по вплавленим моделям / В.Н. Иванов, С.А. Казєннов, Б.С. Курчман и др.; под общ. ред. Я.И. Шкленника, В.А. Озерова. – 3-изд., перераб. и доп. – М.: осква: Машиностроение, 1984. – 408 с.
- 5 Симановский В.М. Технология и материалы форм и стержней для получения литых лопаток ГТД. *Металл и литье Украины*. 2006. № 6. С. 47 –48.
- 6 Дошкарж Й. Точное литьє в керамические формы / Дошкарж Йозеф, О. Валихрах, Я. Габриель, О. Каштанек. – Пер. с чешского А.А. Жукова под ред. Я.Г. Полякова. Москва: Машгиз, 1962 296 с.
- 7 Pat. 6257316 USA, МПК7 B22 D1/18. Investment casting mold and method of manufacture / J. Vandermeer. Publ. 10.07.01.
- 8 А. с. 1603613 А1 СССР, МКИ В22С 7/02. Композиция для изготовления выплавляемых моделей / З.С. Ермолина, В.А. Панкратов, А.Г. Андреева и др. (СССР); заявл. 29.04.88; ДСП.
- 9 Pat. International application published with international search report- WO2018071287A1 B22C1/165/ Method of making investment casting mold / Christopher A. WHITEHOUSE, William S. SNYDER Jr. Publ. 19.04.2018.
- 10 Pat. 6237671 USA B22 D46/22, B22 C1/02. Method of casting with improved detestability of subsurface inclusions / Lassow E.S., Strabel G.R., Koziol K.A. Publ. 10.07.01.
- 11 Pat. 5050665 USA B22 C9/10. Investment cast airfoil core shell lock and method of casting. J.A. Judd. Оупбл. 24.09.91.
- 12 Симановский В.М., Шевченко Б.А., Смирнов С.П. Некоторые особенности технологии применения плавленного кварца при литье по выплавляемым моделям. В: Совершенствование процес сов точного литья и их интенсификация. 1984. С. 47–50.
- 13 Interaction mechanism between DD5 superalloy with different Y content and ceramic molds with Y₂O₃ layer/ Fuwei Wang, Ying Cheng, Yanyun Sun, Qingling Li, Zichen Zha, Kai Guan, Hua-rui Zhang, Hu Zhang// Vacuum, Volume 226, August 2024, 113356. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2024.113356>.
- 14 Alumina-zircon filler based ceramic shell moulds for directionally solidified cast shrouded low pressure turbine blades Y. Venkat ^a, K.R.S. Choudary ^a, D.K. Das ^a, A.K. Pandey ^b, Sar abjit Singh a Ceramics International, Volume 47, Issue 19, 1 October 2021, Pages 27395-27405. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.06.161>
- 15 Properties of hybrid fibre reinforced shell for investment casting Kai Lü, Xiangdong Liu, Zha-oxin Du, Yanfen Li //Ceramics International, Volume 42, Issue 14, 1 November 2016, Pages 15397-15404. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.06.188>
- 16 Carbon-nylon hybrid fibers modified silica sol shell with enhanced flexural strength and heat transfer for investment casting/ Gang Lu, Yisi Chen, Qingsong Yan, Pu Mao, Banglang Chen, Xiao Chen, Qingchun Liao// Journal of the European Ceramic Society, Volume 42, Issue 8, July 2022, Pages 3624-3633. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.03.010>
- 17 Патент на корисну модель № 18889 Україна, МПК В22С 1/00. Суміш для виготовлення ливарних форм / Сімановський В. М., Квасницька Ю. Г., Єфімова В. Г., Єфімов Г. В., Максютя І. І. (ФТІМС НАН України (UA)). Заявка № u200606664 від 15.06.2006 р. Оупбл. 15.11.2006 р. Бюл. № 11.
- 18 Патент на винахід 37036 UA МКВ6 В22 С9/04. Суспензія для виготовлення ливарних форм по моделям, що вплавлються / Сімановський В.М., Прач Т.В., Вольська В.В., Шинський О.Й. Оупбл. 16.04.2001. Бюл. № 3.
- 19 Сімановський В.М. Теорія та технологія модифікування формувальних сумішей для виливків зі спеціальних сплавів: Автореф. Дис. д-ра техн. наук. Київ: ФТІМС НАНУ. 2008. 36 с.
- 20 Патент на винахід № 80076 Україна, МПК В22С 1/16, C04В 35/14. Суміш для виготовлення ливарних керамічних стрижнів / Сімановський В. М., Квасницька Ю. Г., Єфімова В. Г., Максютя І. І., Сушков М. О., Ржевицький М. Є. (ФТІМС НАН України (UA)). Заявка № a200610805 від 12.10.2006 р. Оупбл. 25.05.2007 р. Бюл. № 7.

- 21 Симановский В.М. Обоснование выбора модификаторов для литейных керамических форм и стержней. *Металл и литье Украины*. 2006. № 9–10. С. 31–32.
- 22 Патент на винахід № 82603 Україна, МПК В22С 9/10, С04В 35/04, С04В 35/10. Суміш для виготовлення ливарних керамічних стрижнів / Симановський В. М., Квасницька Ю. Г., Шинський О. Й., Максютя І. І., Сушков М. О., Єфімова В. Г. (ФТІМС НАН України (UA)). – Заявка № а200610804 від 12.10.2006 р. – Опубл. 25.04.2008 р., Бюл. № 8.
- 23 Лашнева В.В., Максютя И.И., Квасническая Ю.Г., Михнян Е.В., Нейма А.В. Комплексное модифицирование керамики на основе оксида алюминия для повышения качества литых изделий медицинского назначения. // *Современные проблемы физического материаловедения*. - 2015. - Вып. 24. – С.44-52.
- 24 Microstructure evolution and mechanical properties of ceramic shell moulds for investment casting of turbine blades by selective laser sintering, Qian Wei, Jiangwei Zhong, Zilin Xu, Qingyan Xu, Baicheng Liu/ *Ceramics International*, Volume 44, Issue 11, 1 August 2018, Pages 12088-12097. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.03.227>
- 25 А.с. 1656761 СССР, МКИ В22 С1/00: 9/04.Суспензия для форм по выплавляемым моделям. /Ю.Ф. Карпович., И.М. Демонис, М.Е. Панина и др. - Опубл. 27.01.1995г. - Бюл. №31.
- 26 Оспенникова О. Г. Модельные композиции на основе синтетических материалов для литья лопаток ГТД / О. Г. Оспенникова, А. Н. Шутов, Л. В.Пикулина, А. М. Душкин. – *Литейное производство*, 2003. – № 1. – С. 21–23.
- 27 Озеров В. А., Муркина А. С. Метод оценки качества гидролизированных растворов этилсиликата 40 // *Методы контроля и исследований в производстве отливок по выплавляемым моделям*. М.: ЦРДЗ. - 1992. - С. 30-33.
- 28 Сапченко И.Г. Влияние пористости удаляемых моделей на их свойства, качество оболочковых форм и отливок в литье по выплавляемым моделям / И.Г. Сапченко, С.Г. Жилин. – *Литейное производство*, 2003. – № 4. – С. 24–27.
- 29 Репях С.И. Формирование точности турбинных лопаток / С.И. Репях, Л.А. Котяхов, А.А. Педаш. – *Литье Украины*. – 2004. – № 1. – С. 4–13, №2. – С. 5–14.
- 30 G.D. Goh, et al., Additive manufacturing in unmanned aerial vehicles (UAVs): challenges and potential, *Aerosp. Sci. Technol.* 63 (2017) 140-151.
- 31 B. Vaupotic, M. Brezocnik, and J. Balic, —Use of PolyJet technology in manufacture of new product, // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 18, no. 1-2, pp. 319–322, 2006.
- 32 Kazmer D. Three-Dimensional Printing of Plastics II , in *Applied Plastics Engineering Handbook (Second Edition)*, William Andrew Publishing, Amsterdam, The Netherlands. 2017. P. 617–634.
- 33 Singh Process capability study of polyjet printing for plastic components//*Journal of Mechanical Science and Technology*. Vol. 25, no. 4, P. 1011–1015, 2011.
- 34 Mechanical and kinetic studies on the refractory fused silica of integrally cored ceramic mold fabricated by additive manufacturing, Chang-Jun Bae ^a, Daniel Kim ^b, John W. Halloran/ *Journal of the European Ceramic Society*, Volume 39, Issues 2–3, February–March 2019, Pages 618-623. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.09.013>
- 35 Замковой В.Є. Удосконалення процесів формування внутрішньої порожнини охолоджуваних лопаток ГТД. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня канд. техн. н., Київ, 2005.Квасническая Ю. Г. Повышение эксплуатационных характеристик рабочих лопаток турбин современных промышленных ГТД. *Металл и литье Украины*. 2015. № 8. С. 29–31.
- 36 Квасническая Ю. Г. (2015). Повышение эксплуатационных характеристик рабочих лопаток турбин современных промышленных ГТД. *Металл и литье Украины*. 2015. № 8. С. 29–31.
- 37 Симановский В. М., Максютя И. И., Квасническая Ю. Г., Притуляк А. С., & Левченко Ю. Н. (2009). Керамические стержни и фильтрующие элементы для литья охлаждаемых лопаток ГТД. *Процессы литья*. 2009. № 1. С. 43–47.

- 38 Братухин А. Г., Язов Г. К., & Карасев Б. Е. (Ред.) Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей. *Машиностроение*. 1997. С. 18–20.
- 39 Ceramic cores for turbine blades via injection moulding Magdalena Gromada ^a, Adam Świeca ^a, Marek Kostecki ^b, Andrzej Olszyna ^b, Rafał Cygan// Journal of Materials Processing Technology, Volume 220, June 2015, P. 107–112. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.01.010>

Надійшла 17.01.2025

References

- 1 Repyah, S. I. (2006). Technological fundamentals of casting with expendable patterns. Dnipro: Lira LTD [in Russian].
- 2 Greskovich, C. D. (2007). Method for making investment casting molds for casting superalloys (Patent No. 4026344)
- 3 Kurenkova, O. A. (1998). Water-based ethyl silicate binders in investment casting. In *Proceedings of the All-Russian Youth Conference* (Vol. 4.1, pp. 93–94).
- 4 Ivanov, V. N., Kazennov, S. A., & Kurchman, B. S. (1984). *Lityo po vplyvaemym modelyam* (3rd ed., revised and supplemented, Y. I. Shklenik & V. A. Ozerov, Eds.). Moscow: Mashinostroenie. [in Russian].
- 5 Simanovsky, V. M. (2006). Tekhnologiya i materialy form i sterzhney dlya polucheniya litykh lopatok GTD. *Metall i lite Ukrainy*, (6), 47–48. [in Russian].
- 6 Doshkarzh, J., Valikhrah, O., Gabriel, J., & Kashtanek, O. (1962). *Tochnoe lityo v keramicheskie formy* (A. A. Zhukov, Trans.; Y. G. Polyakov, Ed.). Moscow: Mashgiz. [in Russian].
- 7 Vandermeer, J. (2001). *Investment casting mold and method of manufacture* (U.S. Patent No. 6257316). U.S. Patent and Trademark Office.
- 8 Ermolina, Z. S., Pankratov, V. A., Andreeva, A. G., et al. (1988). *Kompozitsiya dlya izgotovleniya vyplyvaemykh modeley* (A. S. 1603613 A1 USSR). [in Russian].
- 9 Whitehouse, C. A., & Snyder, W. S. (2018). *Method of making investment casting mold* (WO2018071287A1). International Patent Application.
- 10 Lassow, E. S., Strabel, G. R., & Koziol, K. A. (2001). *Method of casting with improved detestability of subsurface inclusions* (U.S. Patent No. 6237671). U.S. Patent and Trademark Office.
- 11 Judd, J. A. (1991). *Investment cast airfoil core shell lock and method of casting* (U.S. Patent No. 5050665). U.S. Patent and Trademark Office.
- 12 Simanovsky, V. M., Shevchenko, B. A., & Smirnov, S. P. (1984). Nekotorye osobennosti tekhnologii primeneniya plavlenogo kvartsa pri lite po vyplyvaemym modelyam. In *Sovershenstvovanie protsessov tochnogo litya i ikh intensifikatsiya* (pp. 47–50). [in Russian].
- 13 Wang, F., Cheng, Y., Sun, Y., Li, Q., Zha, Z., Guan, K., Zhang, H., & Zhang, H. (2024). Interaction mechanism between DD5 superalloy with different Y content and ceramic molds with Y2O3 layer. *Vacuum*, 226, 113356. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2024.113356>
- 14 Venkat, Y., Choudary, K. R. S., Das, D. K., Pandey, A. K., & Singh, S. (2021). Alumina-zircon filler based ceramic shell moulds for directionally solidified cast shrouded low pressure turbine blades. *Ceramics International*, 47(19), 27395–27405. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.06.161>
- 15 Lü, K., Liu, X., Du, Z., & Li, Y. (2016). Properties of hybrid fibre reinforced shell for investment casting. *Ceramics International*, 42(14), 15397–15404. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.06.188>
- 16 Lu, G., Chen, Y., Yan, Q., Mao, P., Chen, B., Chen, X., & Liao, Q. (2022). Carbon-nylon hybrid fibers modified silica sol shell with enhanced flexural strength and heat transfer for investment casting. *Journal of the European Ceramic Society*, 42(8), 3624–3633. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.03.010>

- 17 Simanovsky, V. M., Kvasnytska, Y. G., Yefimova, V. G., Yefimov, H. V., & Maksyuta, I. I. (2006). *Sumish dlya vyhotovlennya lyvarnya form* (Ukrainian Patent No. 18889). Ukrainian Intellectual Property Office [in Ukrainian].
- 18 Simanovsky, V. M., Prach, T. V., & Volska, V. V. (2001). *Suspensiya dlya izgotovleniya form po vyplyvaemym modelyam* (Patent No. 37036 UA). [in Russian].
- 19 Simanovsky, V. M. (2008). *Teoriya ta tekhnolohiya modyfikuvannya formuval'nykh sumishey dlya vylyvkiv zi spetsial'nykh splaviv* (Doctoral dissertation abstract). Kyiv: FTIMS NANU. [in Ukrainian].
- 20 Simanovsky, V. M., Kvasnytska, Y. G., Yefimova, V. G., Maksyuta, I. I., & Sushkov, M. O. (2007). *Sumish dlya vyhotovlennya lyvarnya keramichnykh stryzhney* (Patent No. 80076 UA). [in Ukrainian].
- 21 Simanovsky, V. M. (2006). Obosnovanie vybora modifikatorov dlya liteynykh keramicheskikh form i sterzhney. *Metall i lite Ukrainy*, 9–10, 31–32. [in Russian].
- 22 Simanovsky, V. M., Kvasnytska, Y. G., Shynskiy, O. Y., Maksyuta, I. I., Sushkov, M. O., & Yefimova, V. G. (2008). *Sumish dlya vyhotovlennya lyvarnya keramichnykh stryzhney* (Patent No. 82603 UA). Ukrainian Intellectual Property Office. [in Ukrainian].
- 23 Lashneva, V. V., Maksyuta, I. I., Kvasnytska, Y. G., Mikhnyan, E. V., & Neyma, A. V. (2015). Kompleksnoe modifitsirovanie keramiki na osnove oksida alyuminiya dlya povysheniya kachestva litykh izdeliy meditsinskogo naznacheniya. *Sovremennye problemy fizicheskogo materialovedeniya*, (24), 44–52. [in Russian].
- 24 Wei, Q., Zhong, J., Xu, Z., Xu, Q., & Liu, B. (2018). Microstructure evolution and mechanical properties of ceramic shell moulds for investment casting of turbine blades by selective laser sintering. *Ceramics International*, 44(11), 12088–12097. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.03.227>
- 25 Karpovich, Y. F., Demonis, I. M., Panina, M. E., et al. (1995). *Suspensiya dlya form po vyplyvaemym modelyam* (A. S. 1656761 USSR). Published on January 27, 1995, Bulletin No. 31. [in Russian].
- 26 Ospennikova, O. G., Shutov, A. N., Pikulina, L. V., & Dushkin, A. M. (2003). Modelnye kompozitsii na osnove sinteticheskikh materialov dlya litya lopatok GTD. *Liteynoe proizvodstvo*, (1), 21–23. [in Russian].
- 27 Ozerov, V. A., & Murkina, A. S. (1992). Metod otsenki kachestva gidrolizovannykh rastvorov etilsilikata 40. In *Metody kontrolya i issledovaniy v proizvodstve otlivok po vyplyvaemym modelyam* (pp. 30–33). Moscow: TsRDZ. [in Russian].
- 28 Sapchenko, I. G., & Zhilin, S. G. (2003). Vliyanie poristosti udalyaemykh modeley na ikh svoystva, kachestvo obolochkovykh form i otlivok v lite po vyplyvaemym modelyam. *Liteynoe proizvodstvo*, (4), 24–27. [in Russian].
- 29 Rep'yakh, S. I., Kotyakhov, L. A., & Pedash, A. A. (2004). Formirovanie tochnosti turbinnykh lopatok. *Lite Ukrainy*, (1), 4–13; (2), 5–14. [in Russian].
- 30 Goh, G. D., et al. (2017). Additive manufacturing in unmanned aerial vehicles (UAVs): Challenges and potential. *Aerospace Science and Technology*, 63, 140–151.
- 31 Vaupotic, B., Brezocnik, M., & Balic, J. (2006). Use of PolyJet technology in manufacture of new product. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 18(1–2), 319–322.
- 32 Kazmer, D. (2017). Three-dimensional printing of plastics. In *Applied Plastics Engineering Handbook* (2nd ed., pp. 617–634). William Andrew Publishing.
- 33 Singh, R. (2011). Process capability study of PolyJet printing for plastic components. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 25(4), 1011–1015.
- 34 Bae, C. J., Kim, D., & Halloran, J. W. (2019). Mechanical and kinetic studies on the refractory fused silica of integrally cored ceramic mold fabricated by additive manufacturing. *Journal of the European Ceramic Society*, 39(2–3), 618–623. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.09.013>

- 35 Zamkovoy, V. Y. (2005). Udoskonalennya protsesiv formuvannya vnutrishn oyi porozhnyny okhologdzhuvanykh lopatok GTD. (Candidate dissertation abstract). Kyiv. [in Ukrainian].
- 36 Kvasnytska, Y. G. (2015). Povyshenie ekspluatatsionnykh kharakteristik rabochikh lopatok turbin sovremennykh promyshlennykh GTD. *Metall i lite Ukrainy*, (8), 29–31. [in Russian].
- 37 Simanovsky, V. M., Maksyuta, I. I., Kvasnitskaya, Yu. G., Pritulyak, A. S., & Levchenko, Yu. N. (2009). Ceramic rods and filter elements for casting cooled blades of gas turbine engines. *Casting Processes*, (1), 43–47.
- 38 Bratukhin, A. G., Yazov, G. K., & Karasev, B. E. (Eds.). (1997). *Modern technologies in gas turbine engine production* (pp. 18–20). Moscow: Mashinostroenie. [in Russian].
- 39 Gromada, M., Świeca, A., Kostecki, M., Olszyna, A., & Cygan, R. (2015). Ceramic cores for turbine blades via injection moulding. *Journal of Materials Processing Technology*, 220, 107–112. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.01.010>

Received 17.01.2025

K.H. Kvasnytska, Post Graduate Student, katonish@gmail.com;
<https://orcid.org/0000-0001-8712-9285>

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

WAYS TO ELIMINATE THE SHORTCOMINGS OF THE TECHNOLOGY OF CASTING PARTS OF GAS TURBINE ENGINES

With the development of the Ukrainian gas turbine industry, the designs of gas turbine engines and installations are increasingly being improved. However, this leads to the complication of blade designs, which are an important component of these systems. As a result, the production of these blades becomes more difficult and requires more effort. The task is to improve the efficiency of the production process of cast blades, ensuring high product quality. Research conducted in this field shows that most of the scientific work related to the casting of gas turbine engine blades is focused on the development of new alloys. However, ceramic molds do not receive enough attention, although they have a significant effect on the properties, geometry and quality of the manufactured blades. Despite the long-term experience of Ukrainian turbo-building enterprises, the production of cast blades is imperfect, and the percentage of defects is quite high, sometimes reaching 60%. The highest percentage of failure (up to 40%) is explained by the presence of defects such as heterogeneity, thermal cracks and gouging of rods. These defects occur at the stage of obtaining ceramic forms due to the imperfection of the used modeling masses, molding materials and rod system. As a result, enterprises experience large production losses, so the development of measures to reduce the percentage of defects becomes relevant and necessary. It is necessary to develop measures aimed at solving this problem and reducing the percentage of defects. This may include research and implementation of new model masses, molding materials and rod system that will be as accurate and reliable as possible. It is also important to analyze and improve the processes of forming ceramic molds in order to eliminate their imperfections, which lead to defects in cast blades.

Keywords: foundry production, melt, ceramic form, casting, strength, modification.