ПРОБЛЕМИ ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМИ

УДК: 621.74.045

П. Б. Калюжний, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.;

e-mail: kpb.ptima@gmail.com

О. В. Михнян, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.;

e-mail: mixnyan@ukr.net

М. М. Ворон, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.;

e-mail: mihail.voron@gmail.com

А. М. Тимошенко, канд. техн. наук, наук. співроб.; e-mail: marschal@i.ua

О. В. Нейма, мол. наук. співроб.; e-mail: neima_alex@ukr.net

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

ПРОБЛЕМИ ВИБОРУ МАТЕРІАЛІВ КЕРАМІЧНИХ ФОРМ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ ФАСОННИХ ВИЛИВКІВ ІЗ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

Виробництво точного дрібносерійного або одиничного титанового литва є економічно і технологічно доцільним за умови використання одноразових керамічних ливарних форм. Надзвичайно важливим є вибір матеріалу внутрішнього контактного шару форми та забезпечення заданих технологічних характеристик – шорсткості, міцності, тощо. В ході аналізу, представленого в статті показано, що серед керамічних вогнетривів найкращу інертність до дії титанових сплавів демонструють оксид ітрію, цирконати кальцію та барію. Але через низькі технологічні властивості такі покриття не набули широкого застосування. Показано, що сполучні речовини також значною мірою впливають на інертність керамічних форм. Зменшення взаємодії титану з керамічними формами, які містять кремнезем у якості сполучної речовини, може бути досягнуто за рахунок введення мінімальної кількості SiO_2 . З екологічної точки зору замість етилсилікатів краще застосувати водні розчини кремнезолів. Перспективними сполучними матеріалами є також алюмозолі та золі цирконію. Визначено, що підвищення інертності корундових форм може бути досягнуто шляхом їх модифікування добавками дрібнодисперсного порошку титану, який при спіканні утворює захисний шар на поверхні форм, що зменшує взаємодію рідкого металу з керамічною формою. Відзначається, що механізм утворення реакційного (альфованого) шару на поверхні титанових виливків до цього часу точно не визначений. Міжфазні реакції між титаном та керамічною формою не можна передбачити лише термодинамічним розрахунком, а потрібно враховувати коефіцієнти змочування матеріалів, хімічний склад сплаву, кінетику процесів розчинення та випаровування вогнетривких оксидів.

Ключові слова: титанове литво, лиття в одноразові керамічні форми, взаємодія розплаву та форми.

Виготовлення виробів та деталей з титану та його сплавів може проводитися різними технологіями. Одержувати титанові вироби складної геометрії найбільш раціонально методами точного лиття. Такий підхід відповідає принципам ресурсозбереження, адже точні литі заготовки за своєю конфігурацією наближаються до геометрії кінцевого виробу, а тому потребують мінімальної подальшої обробки.

До ливарних форм, які використовуються для лиття титанових сплавів, висуваються особливі вимоги, що обумовлено високою хімічною активністю титанових розплавів. Вважалося, що найбільшою хімічною стійкістю до титану володіють форми на основі вуглецевих матеріалів (графіту, коксу, піровуглецю та ін.), [1]. При виготовленні графітових форм за моделями, що витоплюються, в формувальних сумішах в якості сполучних матеріалів використовують фуранові та фенолформальдегідні смоли [2], які при прожарюванні форм перетворюються в кокс, який при високих температурах розкладається з виділенням значної кількості газу, що негативно позначається на якості виливків. Крім того такі графітові форми мають невисоку міцність на згин та велику і нестабільну усадку, що обмежує їх використання. Також іншими недоліками графітових форм є незадовільні санітарно-гігієнічні умови роботи з вуглецевими матеріалами та їх дефіцитність [1, 3].

Зважаючи на недоліки графітових форм для виробництва точного титанового литва складної конфігурації сьогодні все частіше використовуються керамічні оболонкові форми. Тому метою даної статті є аналіз публікацій, в яких висвітлено результати досліджень взаємодії титану з керамічними формами, визначення матеріалів керамічних форм та технологічних рішень, які б дозволяли отримувати якісні титанові виливки.

Вибір матеріалів керамічних форм для лиття титанових сплавів обумовлений багатьма чинниками – вартістю, доступністю, хімічною інертністю. Найчастіше керамічні форми для лиття титану виготовляли з електрокорунду з сполучними на основі кремнезему, які є доступними та відносно недорогими матеріалами. Однак електрокорундові форми не дозволяють отримати виливки вільні від газонасиченого поверхневого шару. У зв'язку з цим багато досліджень, як теоретичних так і практичних, спрямовано на пошук альтернативних вогнетривів, які можна використати для виготовлення керамічних форм для лиття титану.

Зокрема в роботі [4] для лиття технічно чистого титану та сплаву Ti6Al4V окрім графітових і корундових використовували форми з вогнетривких матеріалів ZrO_2 , $CaZrO_3$ та CaO . Результати дослідження показали, що зразки, одержані в формах з ZrO_2 , характеризувалися найбільшою товщиною видозміненого поверхневого шару, Al_2O_3 – середньою, $CaZrO_3$ та CaO – найнижчою, приблизно рівною графітовій формі. Відповідно глибина шару з підвищеною твердістю була найвища для форм з ZrO_2 , середня – для Al_2O_3 , найменша – для $CaZrO_3$ та CaO , тобто останні два вогнетриви найменше взаємодіяли з титановими сплавами. Застосування MgO в якості матеріалу кераміки ливарних форм [5] дозволило отримати на титанових зразках реакційних шар в 3 рази тонший, ніж в корундових формах, та знизити поверхневу мікротвердість титанових виливків.

Вивчення складу та мікроструктури поверхневого реакційного шару титанових виливків з керамічними матеріалами на основі Al_2O_3 [6] показало, що на поверхні титанових виливків є два шари, причому зовнішній шар представляє собою шар оксиду, а внутрішній шар представляє собою шар сплаву, що включає Ti_3Al і Ti . Формування останнього пояснюється тим, що Al_2O_3 розчиняється в розплавленому титані у формі атомних Al і O , а коли розплав застигає в ньому виділяються Ti_3Al і Ti_xO_y .

Дослідження [7] взаємодії сплаву $Ti-47Al-2Cr-2Nb$ з Al_2O_3 , ZrO_2 та Y_2O_3 формами у високотемпературних та тривалих умовах показали, що міжфазні реакції між сплавом та оксидами алюмінію та цирконію були серйозними. Взаємодія між $TiAl$ сплавом та формою з Y_2O_3 була слабкою, відповідно на межі розділу сплав-форма не було явного реакційного шару, а в матриці сплаву виявлено лише невелику кількість включень $Al-Y$ оксиду. В іншій роботі [8] показано, що під дією високотемпературного потоку $TiAl$ розплаву відбувається розчинення оксиду ітрію з лицьового шару, причому кисень з Y_2O_3 дифундував в сплав $TiAl$ і взаємодіяв з ним, утворюючи різні мікроструктури та фази (такі, як збагачені киснем Ti_3Al та Al_2O_3). Після охолодження металу розчинений ітрій знову осаджувався на міжфазній поверхні металу у вигляді включень ітрію.

Випробування матеріалів керамічних форм, більш дешевих за $Y_2O_3 - ZrSiO_4$, Al_2O_3 ,

ZrO₂ стабілізований 6 % та 10 % ітрію [9], продемонстрували, що тільки лицьовий шар з Y₂O₃ не викликає утворення альфа-шару на поверхні виливків із титану.

У роботі [10] для зменшення виробничих витрат використовували лицьові шари з Y₂O₃ в поєднанні з верхніми шарами форми з ZrO₂. Такі форми не демонстрували доказів реакції між сплавом Ti-48Al та керамікою, а товщина альфа-шару становила лише 25 мкм, в той час як у чисто ZrO₂ формах на поверхні виливків утворювався шар оксиду Al₂O₃ товщиною до 15 мкм, а товщина альфа-шару становила 75 мкм.

З метою зменшити вартість керамічної форми при збереженні хімічної інертності лицьового покриття в роботах [11, 12] запропоновано до Y₂O₃ додавати Al₂O₃ та ZrO₂. Результати досліджень [11] показали, що взаємодії між матеріалом лицьового покриття Al₂O₃ – Y₂O₃ та сплавом TiAl не спостерігалось, коли добавки Al₂O₃ були нижчими за 33,33 моль%. Форми з лицьовим покриттям Y₂O₃–Al₂O₃–ZrO₂ (33,33 моль% та 33,33 моль% відповідно) [12] продемонстрували гарну хімічну інертність у порівнянні з лицьовими покриттями з оксиду ітрію.

Багато робіт [13–16] присвячено дослідженню взаємодії титану з керамічними формами на основі ZrO₂, чистого або стабілізованого оксидами CaO чи Y₂O₃. У роботі [13] відзначається, що характер взаємодії титану і ZrO₂ залежить від типу стабілізатора та його кількості, зокрема встановлено, що додавання 5 мол.% CaO демонструє найкращі показники (порівняно з 9 та 17 мол.% CaO) завдяки формуванню тонкого шару TiO, який поводить як дифузійний бар'єр між Ti та ZrO₂. Результати досліджень [14] показують, що при взаємодії ZrO₂ з рідким титаном цирконій частково відновлюється титаном до дефіцитного киснем цирконію (ZrO_{2-x}). При литті сплаву Ti-46Al в форми з лицьовим шаром з ZrO₂ стабілізованим CaO [15] у поверхневому шарі виливка утворюються частинки Al₂Zr та (Ti, Zr)₅Si₃.

Особливий інтерес представляють результати щодо використання для виготовлення керамічних форм циркону ZrSiO₄, який є досить поширеним матеріалом в Україні та широко застосовується в ливарному виробництві. Результати досліджень [17] демонструють, що на виливках зі сплаву Ti6Al4V, одержаних в керамічних формах з ZrSiO₄, товщина дифузійного шару була на 50 мкм меншою, ніж у виливків, одержаних в формах із Al₂O₃. В інших роботах [9, 18] порівняння кераміки на основі циркону з кераміками Al₂O₃, ZrO₂ та Y₂O₃ показало, що циркон поступається за інертністю оксидам алюмінію, цирконію та ітрію. В дослідженні [19] для керамічних форм з Al₂O₃ та ZrSiO₄ товщина шару з підвищеною твердістю на виливках зі сплаву TiAl була майже однаковою.

Загалом аналіз літератури показує, що результати досліджень взаємодії кераміки на основі циркону з титановими сплавами різняться, і в порівнянні електрокорундом циркон проявляє як вищу, так і нижчу інертність. Це може пояснюватися різним хімічним складом порошків циркону та різними умовами проведення експериментів.

Дослідження останніх років показують, що перспективними матеріалами для лицьового покриття керамічних форм є CaZrO₃ та BaZrO₃. Зокрема в [20] виявлено, що реакція форми на основі цирконату кальцію CaZrO₃ з титаном була дуже низькою. Дослідження [21] показали, що обсіпка керамічних форм Al₂O₃ реагувала з наповнювачем CaZrO₃ лицьового покриття, утворюючи (Zr, Ca)O₂ і CaAl₂O₆ при температурі близько 1650 °C. При використанні ZrO₂ в якості обсіпки не спостерігалось взаємодії, за винятком деяких тріщин, що виникали в лицьовому покритті внаслідок зміни об'єму ZrO₂ під час його нагрівання. При дії титанового сплаву на лицьове покриття продукти взаємодії обсіпки та наповнювача CaZrO₃ вступали в реакцію з титаном, внаслідок чого кисень проникав у сплав. Окрім кисню, іони Si і Zr з покриття також проникали в сплав, утворюючи (Ti, Zr)₅(Si, Al)₃ і ZrAl₂ фази з твердим розчином іонів Ti. Тобто незважаючи на те, що термодинамічна інертність CaZrO₃ є високою, фактичні взаємодії між лицьовим покриттям форми та титановим сплавом були більш складними, і призводили до насичення поверхні виливка киснем та включеннями інших фаз.

Не зважаючи на перспективність цирконату кальцію його технологічні властивості потребують покращення, тому в роботі [22] спробували поліпшити термомеханічні

властивості кераміки на основі CaZrO_3 шляхом додавання грубозернистих наповнювачів MgO і SrCO_3 . Додавання SrCO_3 покращило стійкість до термічних ударів, що пояснюється нижчим коефіцієнтом температурного розширення, зменшенням розміру пор і їх однорідним розподілом, кращим зв'язком між матрицею та грубозернистими наповнювачами.

Цирконат барію BaZrO_3 хоч і показує гарну інертність до титанових розплавів, але має незадовільні технологічні властивості, тому може використовуватися лише з добавками інших вогнетривів. В [23] спробували поліпшити характеристики вогнетриву BaZrO_3 шляхом додавання CaZrO_3 . При цьому введення добавок CaZrO_3 у кількості 10 і 20 мол. % сприяло ущільненню та росту зерен завдяки утворенню твердих розчинів $\text{BaZrO}_3\text{--CaZrO}_3$. Термодинамічний розрахунок для утворених сполук $\text{BaZrO}_3\text{--CaZrO}_3$ показав теоретичне збільшення ступеня інертності вогнетривкового матеріалу до розплавів титану. Використання для корундових форм в якості лицевого покриття BaZrO_3 з добавками Y_2O_3 [24] дало змогу отримати титанові зразки з товщиною дифузійного шару всього лише 10 мкм, що говорить про перспективність даного покриття.

Хоча матеріали CaO , MgO , CaZrO_3 , Y_2O_3 показують гарну інертність до титанових розплавів, але не отримали широкого розповсюдження через певні технологічні недоліки. Зокрема оксид ітрію Y_2O_3 має високу вартість матеріалу, низьку живучість суспензії та погані властивості спікання. CaO складний у застосуванні на практиці, MgO має низьку стійкість до термічного удару, а також обидва оксиди мають високу гігроскопічність. Наразі розробка заходів щодо покращення технологічних властивостей керамік з CaO , MgO , CaZrO_3 , Y_2O_3 залишається актуальним завданням.

Проведений аналіз демонструє, що окрім того, що існує велика кількість інертних до титану матеріалів, але вони мають певні технологічні обмеження. Тому окрім вибору вогнетривких матеріалів для керамік потрібно розробити технології виготовлення керамічних форм, які б забезпечували одержання якісних виливків з заданими параметрами шорсткості, геометричної точності та фізико-механічними властивостями.

Реакція на поверхні метал-форма для титанових виливків залежить не тільки від природи вогнетривкового наповнювача суспензії чи обсіпки, але і від сполучної речовини, яка зв'язує частинки вогнетриву між собою. Найбільш поширеними сполучними матеріалами, що використовуються при виготовленні керамічних форм, є кремнезоль (колоїдні золі діоксиду кремнію) та етилсилікати. Оскільки до їх складу входить SiO_2 , який є менш термодинамічно стабільним за діоксид титану, то велика кількість досліджень присвячена вивченню впливу сполучних на основі SiO_2 на інертність керамічних форм та пошуку альтернативних сполучних матеріалів.

В роботі [25] визначено, що керамічні форми, виготовлені з Al_2O_3 та Y_2O_3 із застосуванням сполучної речовини на основі SiO_2 , призводять до утворення реакційного шару на титанових виливках однакової товщини. Це вказує на те, що сполучна речовина на основі SiO_2 зменшує інертність більш стійкого вогнетривку, такого як оксид ітрію.

Дослідження корундових форм з різними сполучними матеріалами – звичайним кремнезольом, оцтовим розчином ($\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 1 mol + $(\text{CH}_3\text{COO})_2$) та водним розчином кремнезоль [4] – показало, що найбільшу товщину шару виливків з підвищеною твердістю дали корундові форми з оцтовим сполучним, тоді як кремнезоль та водний розчин показали однакові результати, хоча останній проявив себе трохи краще.

У роботі [26] показано, що реакція між титановими сплавами та керамічними формами $\text{Y}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$ залежить від вмісту SiO_2 у сполучному, при чому, коли вміст SiO_2 менше 20 %, товщина реакційного шару становить менше 3 мкм, при збільшенні вмісту SiO_2 до 25 %, товщина реакційного шару різко зростає приблизно до 15 мкм. При вмісті SiO_2 менше 15 %, незважаючи на хорошу хімічну інертність, міцність лицевого покриття є низькою, тому це призводить до збільшення шорсткості виливків.

Вивчення технологічних властивостей суспензії $\text{Y}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$ [27] показало, що суспензія є стабільною протягом 60 годин. Оболонкова керамічна форма, виготовлена з системи $\text{Y}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$, мала хороші механічні властивості, що забезпечували мінімальне її розтріскування на стадіях видалення разової моделі та заливання. Товщина зміцненого поверхневого шару титанового виливка становила близько 60 мкм.

Вивчення міжфазних реакцій між титаном та лицьовим шаром форми [28], проведене на кераміках на основі ZrO_2 з кремнеземом та водною полімерною сполучною речовиною, показали, що завдяки використанню лицьового шару, вільного від SiO_2 , товщина реакційного шару на поверхні титанового виливка зменшилась до 6 мкм (при 10 мкм для форм з лицьовим шаром, що містили SiO_2), при цьому товщина шару з підвищеною твердістю зменшилась з 320 до 240 мкм.

При виготовленні керамічних форм важливими є технологічні властивості суспензії та кераміки – в'язкість, насипна щільність, суспензійність, швидкість огелювання, міцність та ін. В роботі [29] досліджували вплив різних сполучних речовин (ацетату цирконію, карбонату цирконію амонію та кремнезоль) на вказані властивості кераміки із ZrO_2 (стабілізованого CaO). Сира міцність та міцність після спікання кераміки з SiO_2 вища на 25 % за міцність керамік, які виготовляли з двома іншими сполучними матеріалами. Результати роботи показують, що як технологічні властивості, так і якість поверхні готових виливків залежать від співвідношення наповнювач / сполучна речовина, і для порошку ZrO_2 та ацетату цирконію дане співвідношення становить 2,5:1.

Дослідження [30] властивостей суспензії та покриття з наповнювачем Y_2O_3 – ZrO_2 та різними сполучними речовинами демонструють, що суспензія з глинозем–золь (alumina–sol) має живучість близько трьох днів, суспензія з комерційно доступним цирконієвим золь – 6 годин, а суспензія на основі ітрієвого золь – 1,5 години. Керамічне покриття з глинозем–золь мало найкращі властивості спікання. Впливу виду сполучної речовини на хімічну інертність покриттів не виявлено.

Дослідження властивостей нового покриття ZrO_2 –золь цирконію [31] показали, що його сира міцність та міцність після спікання знаходиться на рівні традиційного покриття ZrO_2 –кремнезоль, а стійкість до осипання значно вища порівняно з ітрієвим покриттям. Під час вивчення стійкості розробленого цирконієвого покриття до сплаву $Ti-46Al-8Nb-1B$ виявлено комбіновані $(Ti,Zr)_5(Si,Al)_3$ і $ZrAl_2$ фази, повторно осажену фазу ZrO_2 та плівку Al_2O_3 на межі розділу. Взаємодія між формою та металом також призводила до утворення на поверхні зразка шару з підвищеною твердістю.

Зважаючи, що стійкість до дії титанового розплаву керамічних форм з електрокорунду є невисокою через наявність SiO_2 , то в роботі [32] запропонували використовувати алюмінієво–ітрієву сполучну речовину. Мікроаналіз контактного шару титанових виливків, отриманих в керамічних алюмінієво–ітрієвих формах, показав, що поверхня титанового виливка має бездефектну структуру, а в контактному шарі кераміки TiO_2 -фаза відсутня, що є свідченням відсутності термохімічної взаємодії металу з ливарною формою. Однак дана сполучна речовина тільки розробляється і для промислового використання поки що недоступна.

У роботі [33] досліджено два типи сполучних речовин – карбонат цирконію амонію (AZC) та гідрат гідроксиду амонію (AMT), які разом з порошками ZrO_2 , Al_2O_3 та Y_2O_3 використовували для виготовлення лицьового покриття керамічних форм для заливання сплаву $Ti-48Al-2Cr-2Nb$. Товщина реакційного шару для покриття $AMT + Y_2O_3$ була найменшою, а лицьові покриття з ZrO_2 продемонстрували найгіршу інертність. Хоча два лицьових покриття $AMT + Y_2O_3$ та $AMT + Al_2O_3$ продемонстрували гарну інертність, однак технологічні властивості останнього виявилися низькими. У даному дослідженні на поверхні виливків не виявлено альфа шару, що, на думку авторів, пов'язано з нижчими температурами плавлення сплавів $TiAl$ та їх мізерно низькою розчинністю. Результати роботи підтверджують той факт, що зміна сполучної речовини впливає на хімічну інертність лицьового покриття до $TiAl$ сплавів.

Використання сполучної речовини $Zr(CH_3COO)_2$ для керамічної форми на основі Y_2O_3 показало [34], що виливок зі сплаву $Ti-6Al-4V$ на поверхні мав реакційний шар, який складався з окисненої плівки титану, зміцненої плівки та зони реакції керамічної форми. Однак автори даної роботи припускають, що реакція викликана окисненням та випаровуванням елементів, і розплав більшою мірою реагує із залишковими газами.

В статті [35] повідомляється про успішну спробу розробки ливарних форм з $CaZrO_3$

з використанням сполучного на водній основі без SiO_2 , який, як уже зазначалося, погіршує інертність кераміки із цирконату кальцію до титанових сплавів. Лиття сплаву Ti6Al4V показало, що лита деталь на поверхні має незначне підвищення твердості, що свідчить про незначну реакцію металу з формою CaZrO_3 , що не містить діоксид кремнію.

Проведений огляд, свідчить про те, що зменшення реакційного шару на поверхні титанових виливків можна досягнути шляхом включення більш термодинамічно стабільної сполучної речовини до складу кераміки, однак вище запропоновані матеріали мають ряд технологічних недоліків. З іншого боку, на сьогоднішній день, використання кремнезолу в якості сполучної речовини обґрунтоване його високими технологічними властивостями та низькою вартістю. Для зменшення можливості взаємодії титану та керамічної форми використання SiO_2 , як сполучної речовини, має бути мінімізовано.

Одержання задовільних технологічних властивостей керамічних матеріалів можна здійснити шляхом комбінування вогнетривких наповнювачів та вибором відповідного сполучного матеріалу. Вище показано, що зменшити вартість керамічних форм з оксиду ітрію можна додаванням більш дешевих оксидів алюмінію та цирконію без істотного зменшення інертності форм. Однак при розробці комплексних керамік потрібно враховувати можливість взаємодії різних матеріалів між собою з утворенням сполук, які матимуть нижчу вогнетривкість.

Зниження взаємодії рідких сплавів з керамічними формами можна досягнути шляхом введенням в кераміку спеціальних добавок, як, наприклад, в роботі [36] в керамічні форми для лиття жароміцних нікелевих сплавів вводили дрібнодисперсні порошки алюмінію та кремнію, підвищуючи таким чином їх інертність.

Колектив дослідників вивчив процеси взаємодії розплаву титану з корундовими формами, в які додавали порошок Ti (45 мкм) [37–40]. В складі лицьового шару форм з $\text{Al}_2\text{O}_3 + 10\%\text{Ti}$ та $\text{Al}_2\text{O}_3 + 50\%\text{Ti}$, які прожарювали при 950°C протягом 2-х годин, виявлено фази TiO_2 та Ti_3Al , які утворювалися при взаємодії порошку титану з Al_2O_3 та киснем повітря. В складі таких же форм з добавками Ti , але прожарених у вакуумі, виявлено фазу Ti_5Si_3 , яка утворювалася при взаємодії з SiO_2 сполучного. Аналіз поверхні титанових виливків показав, що при литті в корундову форму з порошком Ti товщина реакційного шару складала 50 мкм, в той час як при литті в звичайну корундову форму – 350 мкм. Такий ефект автори пояснюють тим, що синтезований поверхневий шар керамічної форми, який окрім Al_2O_3 містить фази TiO_2 , Ti_3Al , Ti_5Si_3 , слугує бар'єром, що знижує взаємодію рідкого титану з керамічною формою та зменшує дифузію елементів форми вглиб виливка.

Безпосереднє додавання порошку TiO_2 до корундових форм [40, 41] було не-ефективним для зменшення товщини альфованого шару. Авторами роботи [42] запропоновано одержувати захисний шар на корундових формах (який складався з TiO_2 , Ti_3Al , TiAl) додаванням порошку TiO_2 та порошку алюмінію, що за переконаннями авторів є більш економічно вигідним, ніж додавання порошку Ti до корундової форми.

При додаванні порошку Ti в керамічні форми на основі Al_2O_3 , ZrSiO_4 та ZrO_2 [43] товщина альфованого шару титанових виливків була значно зменшена (приблизно з 350 до 50–100 мкм), і також зменшена їх поверхнева твердість. Причому найкращі результати показала корундова форма, що пояснюється різною реакційною здатністю між порошком Ti та оксидами форми. Механізм взаємодії автори представляють так, що при контакті титанового розплаву з модифікованою керамічною формою фаза TiO_2 зменшувала безперервну дифузію кисню через проміжну фазу TiO . Фазове перетворення з TiO_2 в TiO не тільки діє як ефективний бар'єр для дифузії кисню, але і зменшує концентрації Al , Si і Zr на поверхні виливка, що може бути спричинено зменшенням площі контакту між добавками порошка Ti в кераміці та титановим розплавом.

Додавання порошку Ti у верхні шари мулітової форми [44] дало змогу зменшити концентрацію кремнію та кисню в міжфазній області метал–форма, оскільки при прожарюванні порошок Ti в мулітовому покритті взаємодіє з SiO_2 сполучного, що в результаті сприяло зменшенню реакційного шару на зразках зі сплаву Ti-6Al-4V .

На основі аналізу розглянутих робіт можна зробити висновок, що модифікування корундової кераміки порошком титану дозволяє зменшити товщину реакційного шару титанових виливків. Крім того модифікована корундова форма є набагато дешевшою, ніж форми, виготовлені з ZrO_2 та Y_2O_3 .

Чисельні дослідження показують, що при литті в керамічні форми на поверхні титанових виливків зазвичай утворюється шар α -зерен, який зазвичай називають альфованим шаром (α -шар), який збагачений киснем, а в деяких випадках – металевими елементами, що виділяються з оксидів керамічних форм. Визначення механізму утворення альфованого шару (реакційного шару) в титанових виливках при литті в керамічні форми є важливою задачею, оскільки правильне розуміння того, як відбувається взаємодія титану та кераміки дасть змогу усунути α -шар або ж одержувати його мінімальну товщину.

Часто для аналізу стабільності вогнетривких оксидів використовується вільна енергія Гіббса. Однак практичні дослідження показують, що навіть термодинамічно стабільні до рідкого титану оксиди можуть взаємодіяти з розплавом титану при певних умовах. Saha та ін. [45] зазначав, що стійкість оксидів до розплавленого титану відповідає не тільки вільній енергії Гіббса утворення оксиду, а залежить і від ефекту розчинення оксидів у рідкому металі.

Автори роботи [46] стверджують, що утворення α -шару між Ti та Al_2O_3 формою не можна пояснити звичайним механізмом, оскільки він утворений не тільки проміжними атомами кисню, але й атомами заміщення металів, розчиненими з матеріалів форми. Крім того реакція між керамічною формою ($Y_2O_3 - SiO_2$) та титановим розплавом Ti–6Al–4V значно залежить від залишкового газу, який міститься в порах оболонкової форми [47]. В роботі [48] визначили, що альфа-шар на титанових виливках складається не тільки з оксидного шару і шару сплаву, а й зі зміцненого шару, що утворюється не лише киснем дифузії, а й замісними елементами, розчиненими з матеріалів ливарної форми.

На основі аналізу мікротвердості виливків визначено [4], що поверхнево-зміцнений шар складається з реакційного шару (α -шару) та шару з підвищеною твердістю. Утворення останнього пояснюють дифузією кисню в об'єм титану після міжфазної реакції метал-форма. Відзначається також [4], що утворення шару з підвищеною твердістю пов'язане з такими факторами: реакційною взаємодією на межі метал-форма з виділенням кисню; поглинанням кисню розплавленим титаном; дифузією кисню через поверхню виливків; розчинним зміцненням елементами, які відновлюються з оксидів вогнетривів.

Аналізуючи поверхні керамічних форм автори роботи [26] запропонували модель взаємодії, згідно якої весь процес складається з трьох стадій: стадії поверхневого контакту, стадії змочування та стадії внутрішньої реакції. Поверхневий контакт існує завжди, а тому розплавлений титан реагує з менш інертними складовими керамічної форми, наприклад SiO_2 , яке присутнє в сполучному. Стадія змочування характеризується затіканням розплаву в поверхневі пори форми, а тому залежить від фізичної структури та типу матеріалів ливарної форми. На третій стадії розплав реагує з матеріалами ливарної форми. Відповідно, якщо матеріали керамічної форми підібрані так, що не змочуються титановим сплавом, то взаємодія зупиняється на другій стадії, і як результат товщина реакційного шару буде мінімальною.

У роботі [49] наголошується, що термодинамічні розрахунки, за допомогою яких частіше за все визначають стабільність керамічних матеріалів у контакті з титановими сплавами, не можуть повною мірою передбачити як буде реагувати титан з керамічною формою. Автор роботи пропонує брати до уваги підхід, який передбачає розчинення кисню та металевих елементів в титані, як у рідкому, так і в твердому стані. А також необхідно враховувати і кінетику взаємодії титанових сплавів з керамікою. Особливо низький тиск пари оксидів має вирішальне значення для забезпечення повільної кінетики реакції. Прикладом цих пояснень є результати досліджень високотемпературних реакцій сплавів титану з оксидом кальцію та

оксидом ітрію. Проаналізовано, що оксид кальцію, який розкладається на кисень і кальцій, демонструє швидке розчинення в CP-Ti та Ti6Al4V через високий тиск пари кальцію. З іншого боку, Y_2O_3 частково розчиняється в титанових сплавах, але має низький тиск пари. Аналіз лужноземельних цирконатів (CaZrO_3 , BaZrO_3) показує, що вони мають дуже низький тиск пари, що повинно забезпечити їх інертність до титану. Проте, як показують експериментальні дослідження, вони не є повністю інертними до титанових сплавів і, як правило, краще працюють у контакті з титановими сплавами з низькою активністю титану. Реакція лужноземельних цирконатів сильно залежить від хімічного складу титанового сплаву, і для сплавів, що містять алюміній, оцінюється утворення нових фаз на межі поділу розплавів титану та вогнетривких матеріалів.

Окрім складу керамічної форми на характер взаємодії її з розплавом впливає хімічний склад титанового сплаву. Наприклад, [33] корундові форми слабше взаємодіють зі сплавами TiAl порівняно з чистим титаном, тому для зменшення реакції між металом та формою необхідно для кожного сплаву підбирати певний вогнетривкий матеріал форми.

Проведений аналіз показує, що міжфазні реакції між титаном та вогнетривким оксидом керамічної форми не можна передбачити лише термодинамічним розрахунком різниці енергій утворення між оксидом титану та вогнетривким оксидом, оскільки механізм їх взаємодії є досить складним. Потрібно також враховувати кінетику процесів розчинення та випаровування, змочуваність вогнетривких матеріалів рідким титаном.

Висновки

На основі проведеного аналізу можна зробити наступні висновки:

- Серед керамічних вогнетривів найкращу інертність до дії титанових сплавів показують оксид ітрію, цирконати кальцію і барію. Однак через низькі технологічні властивості покриття із них поки ще не здобули широкого застосування, тому залишається актуальним завдання розробки технологій виготовлення керамічних форм, які б забезпечували одержання якісних титанових виливків з заданими параметрами шорсткості, геометричної точності та фізико-механічними властивостями.
- Сполучні речовини значною мірою впливають на інертність керамічних форм. Зменшення можливості взаємодії титану і керамічних форм з сполучними речовинами, що містять кремнезем, використання яких наразі обґрунтоване його низькою вартістю та високими технологічними властивостями, може досягнути за рахунок введення мінімальної кількості SiO_2 . З екологічної точки зору замість етилсилікатів краще застосувати водні розчини кремнезолів. Перспективними сполучними матеріалами є алюмозолі та золі цирконію.
- Підвищення інертності корундових форм можна досягнути шляхом їх модифікування добавками дрібнодисперсного порошку титану, який при спіканні утворює захисний шар на поверхні форм, що зменшує взаємодію титану з керамічною формою.
- Механізм утворення реакційного (альфованого) шару на поверхні титанових виливків до цих пір точно не визначений. Міжфазні реакції між титаном та керамічною формою не можна передбачити лише термодинамічним розрахунком, а потрібно враховувати коефіцієнти змочування матеріалів, хімічний склад сплаву, кінетики процесів розчинення та випаровування вогнетривких оксидів.

Список літератури

- 1 Бибиков Е. Л., Глазунов С. Г., Неуструев А. А. и др. Титановые сплавы. Производство фасонных отливок из титановых сплавов. М.: Металлургия, 1983. 255 с.
[Bibikov E. L., Glazunov S. G., Neustruev A. A. et al. (1983). Titanium alloys. Production of shaped castings from titanium alloys. M.: Metallurgy. 255 p.]
- 2 Производство отливок из сплавов цветных металлов: учебник / А. В. Курдюмов, В. Д. Белов, М. В. Пикун и др.: под общ. ред. В. Д. Белова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Издат. Дом МИСиС. 2011. 615 с.
[Kurdyumov A. V., Belov V. D., Pikunov M. V. et al. (2011). Production of castings from alloys of non-ferrous metals: a textbook / Edited by V. D. Belov. 3-d ed. M.: Published. MISiS House. 615 p.]

- 3 Колотило Д. М., Челядинов Л. М. Углеродные литейные формы. Киев : Наукова думка. 1971. 158 с.
[Kolotilo D. M., Chelyadinov L. M. (1971). Carbon molds. Kiev: Scientific opinion. 158 p.]
- 4 Kim, M. G., Kim, S. K., & Kim, Y. J. (2002). Effect of mold material and binder on metal-mold interfacial reaction for investment castings of titanium alloys. *Materials Transactions*, 43(4), 745-750. DOI: <https://doi.org/10.2320/matertrans.43.745>
- 5 Guilin, Y., Nan, L., Yousheng, L., & Yining, W. (2007). The effects of different types of investments on the alpha-case layer of titanium castings. *The Journal of prosthetic dentistry*, 97(3), 157-164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2007.01.005>
- 6 Yu, G. L., Li, N., Li, Y. S., & Wang, Y. N. (2010). Study on surface reaction layer of titanium cast with Al₂O₃-based investment materials. In *Advanced Materials Research* (Vol. 97, pp. 1029-1032). DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.97-101.102>
- 7 Cui, Y., Tang, X., Gao, M., Ma, L., & Hu, Z. (2013). Interactions between TiAl alloy and different oxide moulds under high-temperature and long-time. *High Temperature Materials and Processes*, 32(3), 295-302. DOI: 10.1515/htmp-2012-0120
- 8 Cheng, X., Yuan, C., Green, N. R., & Withey, P. A. (2014). The study of the oxidation of a Ti-45Al-2Nb-2Mn-0.2B alloy in the investment casting using an yttria face coat mould. *Oxidation of metals*, 81(1), 287-298. DOI: 10.1007/s11085-013-9460-5
- 9 Neto, R. L., Duarte, T. P., Alves, J. L., & Barrigana, T. G. (2017). The influence of face coat material on reactivity and fluidity of the Ti6Al4V and TiAl alloys during investment casting. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 231(1-2), 38-48. DOI: <https://doi.org/10.1177/1464420716681824>
- 10 Barbosa, J., Puga, H., Ribeiro, C. S., Teodoro, O. M. N. D., & Monteiro, A. C. (2006). Characterisation of metal/mould interface on investment casting of γ -TiAl. *International Journal of Cast Metals Research*, 19(6), 331-338. DOI: <https://doi.org/10.1179/136404606X163497>
- 11 Cheng, X., Yuan, C., Blackburn, S., & Withey, P. A. (2014). Influence of Al₂O₃ concentration in yttria based face coats for investment casting Ti-45Al-2Mn-2Nb-0.2TiB alloy. *Materials Science and Technology*, 30 (14), 1758-1764. DOI: <https://doi.org/10.1179/1743284713Y.00000000467>
- 12 Cheng, X., Yuan, C., Blackburn, S. et al. A Comparison of the Chemical Inertness of Two Y₂O₃-Al₂O₃-ZrO₂ and Y₂O₃-Al₂O₃ Face Coat Materials Through Sessile Drop and Investment Casting Methods. *Metall Mater Trans A* 45, 3116-3124 (2014). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-014-2261-x>
- 13 Chang, Y.W., & Lin, C. C. (2010). Compositional dependence of phase formation mechanisms at the interface between titanium and calcia-stabilized zirconia at 1550° C. *Journal of the American Ceramic Society*, 93(11), 3893-3901. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2010.03946.x
- 14 Lin, K. F., & Lin, C. C. (1999). Interfacial reactions between Ti-6Al-4V alloy and zirconia mold during casting. *Journal of materials science*, 34(23), 5899-5906. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1004791125373>
- 15 Jia, Q., Cui, Y.Y., & Yang, R. (2004). Intensified interfacial reactions between gamma titanium aluminide and CaO stabilised ZrO₂. *International Journal of Cast Metals Research*, 17(1), 23-28. DOI: 10.1179/136404604225014800
- 16 Sun, S. C., Zhao, E. T., Hu, C., Yu, J. R., An, Y. K., & Guan, R. G. (2020). Characteristics of interfacial reactions between Ti-6Al-4V alloy and ZrO₂ ceramic mold. *China Foundry*, 17(6), 409-415. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41230-020-0106-3>
- 17 Chamorro, X., Herrero-Dorca, N., Rodríguez, P. P., Andrés, U., & Azpilgain, Z. (2017). α -Case formation in Ti-6Al-4V investment casting using ZrSiO₄ and Al₂O₃ moulds. *Journal of Materials Processing Technology*, 243, 75-81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.12.007>
- 18 Aihui, L., Bangsheng, L., Hai, N., Yanwei, S., Jingjie, G., & Hengzhi, F. (2008). Study of interfacial reaction between TiAl alloys and four ceramic molds. *Rare metal materials and engineering*, 37(6), 956-959. DOI: 10.1016/S1875-5372(09)60028-X
- 19 Kim M.G., Sung S.Y., Kim Y. J. Microstructure, metal-mold reaction and fluidity of investment cast-TiAl alloys. *Materials transactions*. 2004. Vol. 45, № 2. P. 536-541. DOI: <https://doi.org/10.2320/matertrans.45.536>
- 20 Klotz, U.E., Legner, C., Bulling, F., Freitag, L., Faßauer, C., Schafföner, S., & Aneziris, C.G. (2019). Investment casting of titanium alloys with calcium zirconate moulds and crucibles. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103(1), 343-353. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03538-z>
- 21 Yuan, C., Cheng, X., & Withey, P. A. (2015). Investigation into the use of CaZrO₃ as a facecoat material in the investment casting of TiAl alloys. *Materials Chemistry and Physics*, 155, 205-210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.02.026>

- 22 Schafföner, S., Bach, M., Jahn, C., Freitag, L., & Aneziris, C. G. (2019). Advanced refractories for titanium metallurgy based on calcium zirconate with improved thermomechanical properties. *Journal of the European Ceramic Society*, 39(14), 4394-4403. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2019.06.007
- 23 Lan, B., Chen, G., Xiao, Y., Feng, Q., Lu, X., & Li, C. (2020). Phase and microstructural evolution of BaZrO₃-CaZrO₃ refractory and its interaction with titanium alloy melt. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 17(5), 2193-2201. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijac.13541>
- 24 Li, C., Li, M., Zhang, H., Ali, W., Qin, Z., Wang, H., & Lu, X. (2017). Fabrication of Y₂O₃ doped BaZrO₃ coating on Al₂O₃ applied to solidification of titanium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 320, 146-152. DOI:10.1016/j.surfcoat.2017.01.079
- 25 Frueh, C., Poirier, D.R. & Maguire, M.C. The effect of silica-containing binders on the titanium/face coat reaction. *Metall Mater Trans B28*, 919-926 (1997). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-997-0019-1>
- 26 Wei, Y.M., Hu, K.H., Lu, Z. G. (2018). Effect of SiO₂ concentration in silica sol on interface reaction during titanium alloy investment casting. *China Foundry*. 15(1):23. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41230-018-7066-x>
- 27 Wei, Y. M., Lu, Z. G., Wu, G. P., & Long, X. Q. (2016). Reaction between Ti-6Al-4V and Y₂O₃-SiO₂ based faceshell for investment casting. *Rare Metals*, 35(12), 901-908. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12598-016-0803-7>
- 28 Farsani, M. A., &Gholampour, R. (2020). Silica-Free Zirconia-Based Primary Slurry for Titanium Investment Casting. *International Journal of Metalcasting*, 14(1), 92-97. DOI: 10.1007/s40962-019-00335-y
- 29 Ertuan, Z., Fantao, K., Yanfei, C., Ruirun, C., & Yuyong, C. (2012). Characterization of zirconia-based slurries with different binders for titanium investment casting. *China Foundry* 9(2):125-130
- 30 Cheng, X., Yuan, C., Blackburn, S., Withey, P. (2014). The study of the influence of binder systems in an Y₂O₃-ZrO₂ facecoat material on the investment casting slurries and shells properties. *Journal of The European Ceramic Society*. 34. 3061-3068. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.03.005>
- 31 Yuan, C., Cheng, X., Holt, G. S., Shevchenko, D., & Withey, P. A. (2015). Investment casting of Ti-46Al-8Nb-1B alloy using moulds with CaO-stabilized zirconia face coat at various mould pre-heat temperatures. *Ceramics International*, 41(3), 4129-4139.
- 32 Varfolomeev, M. S., Moiseev, V. S., & Shcherbakova, G. I. (2018). Perspective ceramic composite materials based on aluminum-yttrium binder composition. *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1121, No. 1, p. 012032.
- 33 Jia, Y., Xiao, S. L., Wang, X. P., Tian, J., Chen, Y.Y., Xu, L. J., ... & Cao, S. Z. (2015). Interactions between TiAl alloy and AZC/AMT binder systems in investment casting. *China Foundry*. 12(6), 391-397. DOI: 1672-6421(2015)06-391-07
- 34 Guo, X., Wei, Y. M., & Lu, Z. G. (2017). Reaction of titanium investment castings made by Zr(CH₃COO)₂-Y₂O₃ shell. *Rare Metals*, 36(6), 465-471. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12598-017-0920-y>
- 35 Freitag, L., Schafföner, S., Lippert, N., Faßauer, C., Aneziris, C.G., Legner, C., & Klotz, U.E. (2017). Silica-free investment casting molds based on calcium zirconate. *Ceramics International*, 43(9), 6807-6814. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.02.098
- 36 Лашнева В. В., Максютя И. И., Квасницкая 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. 58-63.
[Lashneva V. V., Maksyuta I. I., Kvasnytska Yu. G., Mykhniian E. V., Neima A. V. (2015). Complex modification of ceramics based on aluminum oxide to improve the quality of cast medical products. Modern problems of physical materials science. Iss. 24, p. 58-63.]
- 37 Choi, B. J., Lee, S., & Kim, Y. J. (2011). Alpha-case Interfacial Reaction Behavior of Al₂O₃ Mold Containing Interstitial and Substitutional Compounds for Titanium Investment Casting. *Korean Journal of Metals and Materials*, 49(7), 577-582. DOI: 10.3365/KJMM.2011.49.7.577
- 38 Choi, B.J., Kim, Y.J. (2013). Effect of reacted compounds in Al₂O₃+Ti investment mold on alpha-case formation for Ti casting. *Met. Mater. Int.*, 19, 439-444. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12540-013-3009-7>
- 39 Lee, S., Jeon, J.E., & Kim, Y. J. (2016). Interfacial Reaction between Liquid Titanium and Oxide Mold Contained Alpha-case Formation Phase during Investment Casting. *In Proceedings of the 13th World Conference on Titanium*. p. 387. DOI: 10.1002/9781119296126.ch60
- 40 Choi, B. J., Lee, S., & Kim, Y. J. (2013). Influence of TiO₂ on alpha case reaction of Al₂O₃ mould in Ti investment casting. *Materials Science and Technology*, 29(12), 1453-1462. DOI: <https://doi.org/10.1179/1743284713Y.0000000296>

- 41 Lee, S., & Kim, Y. J. (2017). Evaluation of the α -Case with TiO_2 in Mold for Titanium Investment Casting. *International Journal of Metalcasting*, 11(1), 71-76. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40962-016-0093-8>
- 42 Sung, S. Y., Han, B. S., & Kim, Y. J. (2012). Formation of alpha case mechanism on titanium investment cast parts. *Titanium Alloys-Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications*. 29-42. DOI: <https://doi.org/10.5772/35496>
- 43 Choi, B. J., Lee, S., & Kim, Y. J. (2014). Alpha-case reduction mechanism of titanium powder-added investment molds for titanium casting. *Journal of materials engineering and performance*, 23(4), 1415-1423. DOI: [10.1007/s11665-013-0859-6](https://doi.org/10.1007/s11665-013-0859-6)
- 44 Cheng, X., Chai, L., Wu, G., Wang, H., & Nan, H. (2016). Evaluation of Interfacial Interactions Between Ti-6Al-4V and Mold Use Ti-Added Backup Coat in Investment Casting. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47(5), 2313-2318. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3393-y>
- 45 Saha, R. L., & Jacob, K. T. (1986). Casting of Titanium and its Alloys. *Defence Science Journal*, 36(2), 121-141.
- 46 Sung, S. Y., & Kim, Y. J. (2005). Alpha-case formation mechanism on titanium investment castings. *Materials Science and Engineering: A*, 405(1-2), 173-177. DOI: [10.1016/j.msea.2005.05.092](https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.05.092)
- 47 Wei, Y., Lu, Z., Li, X. et al. (2019). Interface reaction during titanium alloys investment casting by residue gas in ceramic mold. *Rare Met.*, 38, 327-335. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12598-018-1138-3>
- 48 Altindis, M., Hagemann, K., Polaczek, A. B., & Krupp, U. (2011). Investigation of the Effects of Different Types of Investments on the Alpha-Case Layer of Ti6Al7Nb Castings. *Advanced Engineering Materials*, 13(4), 319-324. DOI: [10.1002/adem.201000264](https://doi.org/10.1002/adem.201000264)
- 49 Schafföner, S. (2020). Reactions of alkaline earth zirconate refractories with titanium alloys. *The 14th World Conference on Titanium. MATEC Web of Conferences*. Vol. 321, p. 10012. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032110012>

Received 09.11.2021

P. B. Kaliuzhnyi, PhD (Engin.), Senior Research Scientist; e-mail: kpb.ptima@gmail.com
O. V. Mykhniian, PhD (Engin.), Senior Research Scientist; e-mail: mixnyan@ukr.net
M. M. Voron, PhD (Engin.), Senior Research Scientist; e-mail: hail.voron@gmail.com
A. M. Tymoshenko, PhD (Engin.), Research Scientist; e-mail: Marschal@i.ua
O. V. Neima, Junior Research Scientist; e-mail: neima_alex@ukr.net

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

PROBLEMS OF MATERIALS CHOICE FOR CERAMIC MOLDS TO OBTAIN TITANIUM ALLOYS SHAPE CASTINGS

The production of precision small or single-set titanium casting is economically and technologically feasible by providing investment casting in ceramic molds. It is extremely important to choose the material of the mold inner contact layer and to ensure the specified technological characteristics - roughness, strength, etc. In the course of presented analysis, it is shown that among ceramic refractories, the best inertness to the action of liquid titanium alloys is shown by yttrium oxide, calcium and barium zirconates. But, due to low technological properties, such coatings have not been widely used. It is also shown that binders also significantly affect the inertness of ceramic molds. Reducing the interaction of titanium with ceramic molds that contain silica as a binder can be achieved by introducing a minimum amount of SiO_2 . From an ecological point of view, instead of ethyl silicates, it is better to use aqueous solutions of silica. Promising binders are also aluminosols and zirconium sols. It is determined, that increasing the inertness of corundum molds can be achieved by modifying them with dops of fine titanium powder, which forms a protective layer on the surface of the molds during sintering, that reduces an interaction of liquid metal with the ceramic mold. It is noted that the mechanism of the reaction (α) layer formation on the surface of titanium castings is still not precisely defined. Interfacial reactions between titanium and ceramic mold can not be predicted only by thermodynamic calculation, but also must take into account the wetting factors of materials, the chemical composition of the alloy, the kinetics of dissolution and evaporation of refractory oxides.

Keywords: titanium casting, investment casting in ceramic molds, interaction between titanium melt and ceramic mold.