

<https://doi.org/10.15407/plit2024.01.048>

УДК 669.245.018.28:629.7.03.-2262

В.О. Нога, e-mail:volodymyrnoha99@gmail.com; RCID 0009-0002-0796-3240

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

ВИГОТОВЛЕННЯ ВИЛИВКІВ ІЗ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ВІДПОВІДАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Розвиток новітніх газотурбінних двигунів (ГТД) потребує поліпшення та інновацій у виробничих процесах, включаючи впровадження передових методів та інструментів обробки, що відповідають зростаючим стандартам якості та надійності в експлуатації. Головні причини виходу ГТД із ладу часто пов'язані зі зношуванням або ушкодженням ключових елементів турбіни, особливо під час експлуатації в умовах інтенсивної вібрації, високих температур, корозійного середовища та абразивного зношування. У статті розглянуто сучасні рішення й технології виготовлення виливків для деталей відповідального призначення із жароміцних сплавів. Якість виливків залежить від багатьох факторів, таких як склад сплаву, температура плавлення, швидкість зливу, а також якість форми для виливання. Оптимізація наявних жароміцних сплавів є необхідністю, зумовленою підвищенням ресурсу та ефективності функціонування промислового обладнання, зокрема газотурбінних двигунів (ГТД). У статті розглянуто вплив різних технологічних параметрів на якість виливків із жароміцних сплавів. Здійснено огляд наукових праць і публікацій у галузі розробки та лиття жароміцних сплавів для деталей відповідального призначення. Визначено параметри, що мають вагомий вплив на структурно-фазові характеристики виливків при виготовленні деталей відповідального призначення із жароміцних сплавів методом спрямованого твердіння. Зокрема, детально проаналізовано такі аспекти, як вплив хімічного складу сплавів на їх жароміцність і стійкість до окислення, роль режимів термічної обробки в процесі отримання виливків, а також важливість точного контролю технологічних параметрів лиття. Особливу увагу приділено новітнім методам контролю якості виливків. Також розглянуто вплив додавання легуючих елементів на властивості жароміцних сплавів і на якість кінцевих виливків для складнопрофільних деталей ГТД.

Ключові слова: жароміцні нікелеві сплави, газотурбінний двигун (ГТД), лопатка, спрямована кристалізація.

Вступ

Виробництво нових газотурбінних двигунів (ГТД) потребує вдосконалення технологічних процесів, розробок і впровадження якісних нових методів і засобів оброблення, що будуть забезпечувати вимоги щодо якості та експлуатаційної надійності, які постійно зростають. Основною причиною виходу з ладу ГТД є перш за все знос або пошкодження найбільш навантажених деталей турбіни. Знос або пошкодження елементів ГТД нерідко відбувається в процесі експлуатації в умовах підвищеної вібрації та високої температури або внаслідок впливу агресивного корозійного середовища й абразивного зносу [1]. Постійний зв'язок між конструкцією двигуна й технологією його виробництва спонукає до створення

нових матеріалів і ливарних технологій одержання складнопрофільних виливків високої якості. Головна проблема в сучасному двигунобудуванні — це необхідність підвищення ККД через підвищення робочої температури газу на вході в турбіну. Найбільш відповідальними деталями ГТД є робочі й соплові лопатки турбіни. В останні роки в галузі виробництва судових та енергетичних ГТД активно застосовують підвищення їх експлуатаційних характеристик, що стосуються як механічної міцності, так і стійкості до корозії. Цей резерв досягається завдяки використанню спеціальних жароміцних сплавів і вдосконаленню ливарних технологій одержання складнопрофільних виливків [2–8].

Метою даної роботи є аналіз наявних матеріалів і методів керування кристалізацією, устанавлення основних параметрів спрямованої кристалізації для одержання виливків складнопрофільних деталей ГТД із високими експлуатаційними характеристиками.

Огляд уже запропонованих рішень та досліджень

Виготовлення високоякісних виливків із жароміцних сплавів для деталей відповідального призначення є складним і багатоетапним процесом.

Вітчизняні підприємства — виробники газотурбінних установок, такі як ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект», АТ «Мотор Січ», ДП «Івченко-Прогрес», конкурентоспроможні зі світовими виробниками, також працюють над розробленням нових типів ГТД із метою підвищення ефективності турбін, а саме підвищення робочих температур на вході в турбіну

Матеріали

Одним із найпоширеніших матеріалів для виготовлення лопаток ГТД є жароміцні сплави на основі нікелю, названі у світі суперсплавами [1, 3, 6]. Основними легувальними елементами тут є хром, кобальт, молібден, алюміній і титан. Суперсплави відомі своєю здатністю зберігати високу міцність і стійкість до повзучості та руйнування при високих температурах, володіють високими корозійними властивостями. Розробка композицій суперсплавів залежить від впливу різних легувальних елементів на структурні особливості сплаву, а також на роль, яку ці особливості відіграють у забезпеченні бажаних високих експлуатаційних характеристик.

Сьогодні існує багато різновидів жароміцних сплавів, однак, незважаючи на це, як в українській, так і зарубіжній металургійній галузі відбувається постійне розроблення нових сплавів і технологій їх виробництва та оптимізації. Так, останнім часом світові й вітчизняні виробники газотурбінних установок скеровують свою увагу на суперсплави, що містять тугоплавкі метали, як-от реній, тантал, рутеній, для лиття лопаток турбіни. Ці сплави дозволяють підвищити стійкість лопаток до впливу високих температур та агресивних середовищ, що значно покращує продуктивність і тривалість служби ГТД [8–12].

Класичним прикладом зарубіжних сплавів цього класу є сплави INCONEL, NIMONIC, Waspaloy [4, 6]. Хімічний склад нікелевих сплавів, що застосовуються для виготовлення лопаток, досить складний; кожний елемент виконує свою функцію. Додавання хрому в кількості 10–25 % мас. забезпечують його стійкість до окислення та повзучості. Оксид хрому забезпечує захист від навколишнього середовища основного сплаву при високих температурах, обмежуючи швидкість дифузії кисню й сірки всередину, а металевих елементів зі сплаву — назовні [4]. Зміцнення матриці γ -твердого розчину досягається додаванням тугоплавких елементів молібдену та вольфраму [6, 8]. Цей ефект спостерігається при підвищених температурах через повільну дифузію вказаних елементів через структуру матриці. Алюміній і хром також є потужними зміцнювачами твердих розчинів. Залізо, титан, ванадій і кобальт також виконують подібну роль, але меншою мірою. Зміцнення твердих розчинів пов'язане з різницею в атомному діаметрі [4]. Останній ефект частково пов'язаний зі зниженням енергії дефектів укладання, що може призвести до зменшення повзучості за рахунок ускладнення перехресного проковзування в γ -твердому розчині. Такі сплави, як INCONEL 617 і HASTELLOY, мають хорошу повзучість завдяки зміцненню твердими розчинами в поєднанні з гарною стійкістю до окислення й корозії [4].

Сплави на основі нікелю з найвищим опором повзучості мають найвищі об'ємні частки зміцнюючої γ' -фази і високий вміст тугоплавких елементів. Ці сплави, що застосовуються у високотемпературних компонентах турбін, таких як лопатки, які працюють під високим навантаженням, використовуються у литому та термообробленому стані. Прикладами таких сплавів є сплави В-1900, MAR M-200 і IN-738 [6]. Великі компоненти турбін, які не можуть бути відлиті за формою, виготовляються з кованих суперсплавів із меншою об'ємною часткою γ' -фази та меншою міцністю, щоб ці сплави можна було механічно обробити прокаткою або куванням. Такі сплави, як Waspaloy, Udimet 700 та Nimonic 115, мають вищий вміст хрому і нижчий вміст тугоплавких елементів, щоб уникнути утворення небажаних топологічно щільно упакованих фаз, які погіршують властивості цих сплавів [6, 13]. Межа повзучості кованих сплавів нижча, ніж у литих сплавів. Частково ця різниця пов'язана з розміром зерна (монокристалічна чи орієнтована структура); литі сплави мають більший розмір зерна, ніж ковані. Технологія спрямованого твердіння (DS) мінімізувала або усунула межі зерен, що орієнтовані поперечно до прикладеного напруження, і призвела до покращення опору повзучості порівняно з полікристалічними литими сплавами. Поширення цієї технології на виробництво монокристалічних сплавів дозволило ще більше підвищити межу повзучості. Останнє вдосконалення дало змогу відмовитися від таких елементів, як бор, цирконій і гафній, що їх раніше додавали для покращення меж зерен. Прикладами таких спрямовано затверділих і монокристалічних сплавів є DS MAR M-200 з Hf та CMSX-4 відповідно [6, 14, 15].

Розроблені нещодавно матеріали на основі нікелю включають композитні суперсплави та інтерметаліди. Принцип дії композитів полягає у зміцненні пластичної нікелевої матриці міцними волокнами другої фази. Цього можна досягти або шляхом механічного включення волокон, наприклад вольфраму, у матрицю суперсплаву або через спрямоване затвердіння рідких евтектичних сплавів таким чином, що одна фаза зростає з волокнистою або пластинчастою морфологією. Дослідження інтерметалідів були спрямовані на алюмініди нікелю NiAl і Ni_3Al та легування цих основ для досягнення корисних комбінацій міцності й пластичності. Як і очікувалося, сплави на основі інтерметаліду NiAl також демонструють хорошу стійкість до окислення та корозії [8, 13, 14].

Вміст тугоплавких металів, таких як Nb, Mo, Ta, W, Re, для більшості сплавів перевищує 10 %, а сумарний вміст Al і Ti перебуває в діапазоні від 6 до 8 %. Такий склад за рахунок зміцнення за твердорозчинним й дисперсійним механізмом забезпечує досягнення високого значення опору повзучості, що особливо важливо для робочих лопаток. Вміст кобальту відносно високий і перебуває в діапазоні від 8 до 20 % [14]. Кобальт сприяє зміцненню сплаву за твердорозчинним механізмом. Водночас кобальт, розчиняючись у матриці, знижує вміст у ній алюмінію й титану, тим самим сприяючи підвищенню кількості γ' -фази. Крім того, змінюється склад γ' -фази, формується $(\text{Ni}, \text{Co})_3(\text{Al}, \text{Ti})$ з більш високою температурою розчинення [13–15].

Способи виплавлення

Підвищення ресурсу лопаток газотурбінних двигунів ГТД пов'язане не тільки з розробкою нових композицій ЖС, але й з методами керування процесом кристалізації виливків із указаних сплавів. У зв'язку з цим проводяться дослідження процесів, що забезпечують формування в деталях структур, які гарантують збереження необхідних характеристик деталі протягом заданого ресурсу її роботи [16–27]. Відомо, що лопатки ГТД отримують двома методами, а саме рівноосним литтям і литтям із спрямованим твердненням з метою одержання монокристалічних виливків та виливків зі спрямованою кристалізацією (СК) (рис. 1).

Для лиття робочих лопаток ГТД із полікристалічною структурою використовують вакуумні плавильні установки з підігрівом форм (УППФ) кількох модифікацій; конструкції плавильних камер не мають принципової різниці. Контрольованими параметрами технологічного процесу є: глибина вакууму, температура розплаву в процесі плавки, температура печі підігріву форми [5].

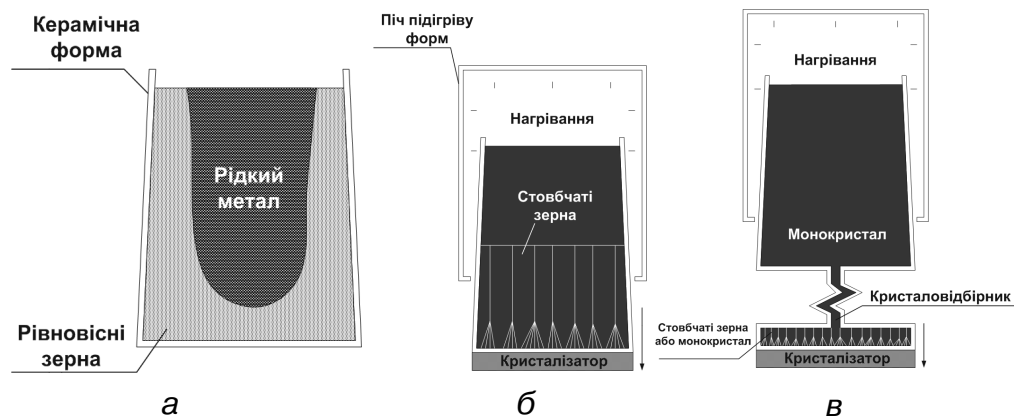


Рис. 1. Технологічні схеми формування рівноосних, спрямованих і монокристалічних виливків [21]

Зростання ресурсу лопаток ГТД відбувається не тільки завдяки створенню нових жароміцних сплавів, але й шляхом вдосконалення методик керування процесом кристалізації відливків із цих матеріалів. Відповідно, ведуться дослідження процесів, які сприяють утворенню потрібних структур у деталях, забезпечуючи збереження необхідних властивостей деталі протягом визначеного ресурсу її експлуатації. Аналізуючи металографічні дослідження випробувань на високотемпературну витривалість лопаток ГТД, спостерігаємо руйнування лопаток ГТД у міжзеренних просторах цих матеріалів. Таким чином, бажано мати лопатку з мінімальною кількістю зерен і можливістю управління їх кристалографічним положенням. Ці аспекти продовжують бути предметом наукових та експериментальних досліджень по всьому світу. Доведено, що руйнування лопаток відбувається на межах зерен, що розташовані перпендикулярно до осі зовнішнього навантаження лопатки ГТД. Тому для збільшення довготривалої міцності нікелевих термостійких сплавів потрібна орієнтована структура, де межі зерен паралельні напрямку основних напружень.

Наступним етапом орієнтованого зміцнення є створення лопаток із монокристалічною структурою. Використання монокристалічних лопаток дозволяє значно підвищити ключові параметри газотурбінних двигунів, зокрема ресурс на 20–30 % і потужність на 10–15 %.

Відомо багато способів отримання спрямованої структури для виплавляння деталей ГТД. Вони відрізняються як методом нагріву та підтримки високих температур в керамічній формі з розплавом, що кристалізується, так і охолодженням готового виробу, тобто способом відведення тепла [28–31]. Учені протягом декількох десятиків років працюють над дослідженнями, обчисленнями, методами керування, встановленням термодинамічних взаємозв'язків між параметрами кристалізації [28–44]. Як відомо, градієнт температури є однією з найважливіших причин виникнення внутрішніх термічних напружень у виробах, які в поєднанні з низькосолідусними прошарками та структурними напруженнями можуть призвести до утворення тріщин (рис. 2) [14].

Морфологія поверхні розділу твердої й рідкої фаз виливків зі спрямованою і монокристалічною структурами, а отже, і внутрішня структура зерна залежать від хімічного складу, теплофізичних властивостей і параметрів кристалізації, тобто швидкості кристалізації V , температурного градієнта між рідиною та поверхнею розділу G , коефіцієнта дифузії розчиненої речовини в рідкій фазі D і й інтервалу кристалізації $\Delta t_{кр}$. Взаємозв'язок цих параметрів виражається таким співвідношенням:

$$ВФПР = G/V - \Delta t_{кр}/D, \quad (1)$$

яке називають визначником форми мікроскопічної поверхні розділу (ВФПР). Коли ВФПР має позитивне значення, поверхня розділу між твердою та рідкою фазами називається плоским фронтом кристалізації [21].

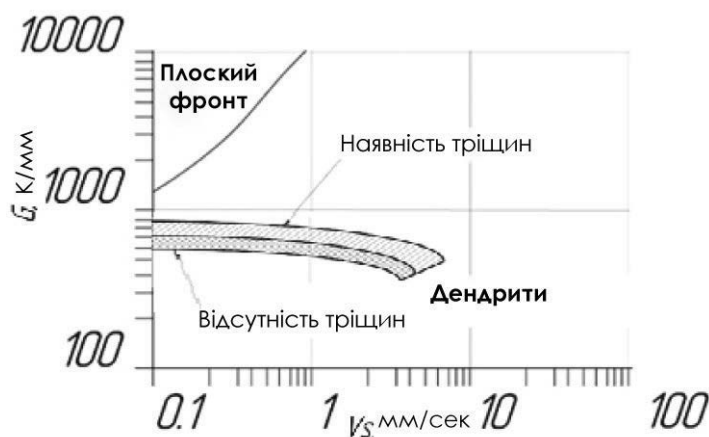


Рис. 2. Формування первинної кристалізованої мікроструктури залежно від градієнта температури та швидкості кристалізації з ділянками, що відповідають зразкам із тріщинами та без тріщин [14]

Аналіз проведених досліджень [30] стосовно керування процесом СК показав, що забезпечення його оптимальних параметрів (G , V , G/V) пов'язане зі складним регулюванням умов у тепловому вузлі установки. Керування ним здійснюється за допомогою зміщення за заданим законом рівноважного стану системи нагрівач — виливок — холодильник.

Основними завданнями теплового аналізу при розробці процесу орієнтованої кристалізації є визначення таких технологічних параметрів:

- оптимальна швидкість кристалізації лопаток;
- градієнт температур на фронті кристалізації;
- швидкість охолодження відливків;
- довжина перехідної твердо-рідкої зони сплаву та її положення стосовно рівня охолоджувача або нагрівача.

Для отримання регулярної орієнтованої структури процес спрямованої кристалізації необхідно організувати так, щоб швидкість зростання була максимальною, а швидкість зародкоутворення — мінімальною. Тому важливо використовувати на вітчизняних підприємствах сучасні вакуумні установки для одержання якісних виливків із жароміцних сплавів.

На провідних підприємствах-виробниках ГТД використовують промислові установки УВНК-8В (кристалізатор — олово) і, найбільше, УВНК-8П (кристалізатор — алюміній) [32–36]. Для підвищення швидкості можна змінювати конструкцію деяких пристроїв. Так, автори [33] пропонують на базі УВНК-8П змінити розташування лопаток у ливарному блоці, що, на їхню думку, повинно привести до інтенсивнішого нагріву лопаток, а в зоні охолодження пропонують використати водоохолоджувальні щільніні холодильники. В установці УВНК-8МП використовується модернізований тепловий вузол із композита вуглець-вуглець, а нагрівачі теплового вузла плаковані карбідом тугоплавкого металу. Такий високий рівень розподілу температур в об'ємі печі підвищує ресурс роботи печі більше, ніж у 2 рази. При цьому стабілізується процес формування монокристалічних виливків [34].

Одним із найефективніших способів забезпечення необхідних характеристик циклічної міцності та довговічності лопаток є вибір оптимальної кристалографічної орієнтації відносно геометрії лопатки з урахуванням великої анізотропії механічних властивостей. Повна кристалографічна орієнтація СК лопатки визначається аксіальною та азимутальною орієнтацією. Чисельні дослідження встановили, а досвід підтвердив, що за комплексом властивостей міцності для лопаток турбіни з оптимальною аксіальною орієнтацією є напрям $[001]$ із точністю $\alpha[001] = 10...15^\circ$. З такою аксіальною орієнтацією виливають спрямовано закристалізовані та монокристалічні лопатки турбіни сучасних ГТД [37].

Для отримання заданої орієнтації у виливках використовують метод затравки. Як затравку при литті лопаток ГТД із жароміцних нікелевих сплавів застосовують Ni–W-сплав (Ni — основа, W 32–36 % мас.) [38, 39].

При литті крупногабаритних лопаток виникають труднощі, пов'язані із застосуванням громіздкої балки з великим об'ємом розплаву алюмінію:

- при зануренні форми в алюміній відбувається суттєва зміна положення рівня його у ванні, що уповільнює швидкість протягування форми, а отже, продуктивність процесу лиття для забезпечення достатньої величини поздовжнього градієнта при кристалізації;

- відбувається забруднення установки субліматами оксидів Al і Si, тобто виникає ймовірність спінування розплаву алюмінію. При прориві форми з розплавом жароміцного сплаву необхідно замінювати ванну з алюмінієм. У розплаві алюмінію затверділі ділянки лопатки охолоджуються з надмірно високою швидкістю, що може спричинити викривлення й розтріскування лопаток, особливо в зоні великогабаритних бандажних лопаток.

Щодо виливків монокристалічних великогабаритних лопаток потужних енергетичних турбін довжиною до 600 мм, то перше місце в їх виготовленні посідає фірма Houmet, яка з 2005 р. використовує метод струменевого газового охолодження форм у вакуумі GCC (Gas Cooling Casting) [40–44].

Технологічний процес GCC полягає в конвективному струменевому охолодженні аргонем у вакуумі керамічних форм при спрямованій кристалізації зі збереженням ефекту охолодження форм випромінюванням, як у процесі Бріджмана. Цей процес дозволяє збільшити кількість лопаток у блоці і швидкість протягування при спрямованій кристалізації. При цьому необхідно уважно контролювати товщину керамічних форм (8–12 мм), тобто останній шар наносити тільки зануренням у суспензію без подальшого обсіпання для підвищення гладкості зовнішньої поверхні. Для газового охолодження форм у процесі GCC використовується аргон чистотою $\geq 99,98\%$.

Для реалізації такого способу спрямованої кристалізації існують пристрої для отримання виливків у вигляді розміщеної у вакуумованій ємності вертикальної циліндричної камери, розділеної термоізолюючим екраном із центральним отвором на зону нагріву й зону охолодження. Камера в зоні нагріву містить пристрої для плавки сплаву й заливання його розплаву в ливарну форму, а в зоні охолодження — сопла, що подають охолоджуючий компонент, переважно інертні гази, на поверхню ливарної форми, яка переміщається із зони нагріву в зону охолодження повз сопла [43].

Автори [44] запропонували модернізацію ливарного агрегату VIM-25-175C із додатковим охолодженням за допомогою інертного газу (аргону). Пристрій для подачі інертного газу для охолодження виконано у вигляді кільцевого газового колектора, який обладнано газовими ежекторами. Ежектори розміщено в ряд, на відстані 45–75 мм від нижньої поверхні термоізолюючого екрану та виконано таким чином, що за їх допомогою можна змінювати напрямок подачі потоку газу для охолодження. Останні виконані так, що за їх допомогою можна змінювати напрямки подачі потоку газу для охолодження й розміщені в ряд на відстані 45–75 мм від нижньої поверхні термоізолюючого екрану. Застосування такого способу охолодження інтенсифікує процес кристалізації розплаву і змінює градієнт температури на фронті кристалізації порівняно з конвективним охолодженням у вакуумі. У результаті суттєво змінюється кінетика структуроутворення.

Висновки

- Розглянуто сучасні рішення й технології виготовлення виливків для деталей відповідального призначення, таких як лопатки газотурбінних двигунів (ГТД). Висвітлено проблему виникнення зерен та нерівномірної кристалічної ґратки в сплавах даного виду й важливість методу спрямованої кристалізації як засобу протидії негативним ефектам деградації та руйнації монокристалічної структури виливка. Також розглянуто сучасні напрацювання в галузі розробки жароміцних сплавів на основі нікелю.

- Висвітлено низку технологічних параметрів, які впливають на якість кінцевого

виливка та сучасні засоби й методики покращення характеристик і стійкості виливків до зовнішнього агресивного середовища. Встановлено, що процес струменевого газового охолодження форм забезпечує збільшення продуктивності порівняно з рідкометалевим охолодженням в 2–3 і 1,5 рази лиття зі спрямованою кристалізацією та монокристалічного лиття виливків складнопрофільних деталей ГТД. Визначено температурно-швидкісні умови процесу спрямованої кристалізації, а саме швидкість переміщення керамічної форми та градієнт температури на фронті росту кристалів, що суттєво впливають на внутрішньозеренну будову, дисперсність і фазовий склад сплаву.

• Подальші дослідження будуть спрямовані на встановлення оптимальних значень градієнта температур та швидкості пересушення форми з камери нагріву в камеру охолодження залежно від конфігурації та розмірів виробу у вакуумних ливарних агрегатах УВНК-8П та VIM-25-175С для одержання робочих лопаток ГТД різних типорозмірів із високими експлуатаційними характеристиками.

Список літератури

- 1 Superalloys for gas turbine engines. (2012). © Woodhead Publishing Limited. (originally published 2001 y.)
- 2 Патон Б.Е., Строганов Г.Б., Кишкин С.Т. и др. Жаропрочность литейных никелевых сплавов и защита их от окисления. Киев: Наукова думка, 1987. 256 с.
- 3 Sims, C.T.; Stoloff, N.S.; Hagel, W.C. Superalloys II: High-Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power; John Wiley & Sons: New York, NY, USA, 1987; 640p. Available online: <https://www.wiley.com/en-us/Superalloys+II%3A+High+Temperature+Materials+for+Aerospace+and+Industrial+Power-p-9780471011477>.
- 4 Olorunfemi, O. (2015). Nickel Based Super Alloys For Gas turbine Applications. Research-Gate, 1(1), 4–15.
- 5 Патон Б., Халатов А., Костенко Д., Білека Б., Письменний О., Боцула А., Парафійник В., Коняхін В. Концепція (проект) державної науково-технічної програми «Створення промислових газотурбінних двигунів нового покоління для газової промисловості та енергетики». Вісник НАН України. 2008. № 4. С. 3–9.
- 6 HWeber. (2016). Nickel-Based Superalloys: Alloying. Special Metals Corporation, Huntington, WV, USA. MK Banerjee, Malaviya National Institute of Technology, Jaipur, India, 1(1), 1–3.
- 7 Balyts'kyi, A.I.; Kvasnyts'ka, Y.H.; Ivas'kevich, L.M.; Myal'nitsa, H.P. Corrosion and Hydrogen-Resistance of Heat-Resistant Blade Nickel-Cobalt Alloys. Mater. Sci. 2018, 54, 230–239. <https://doi.org/10.1007/s11003-018-178-z>.
- 8 Reed, R. C. (2006). The superalloys fundamentals and applications. Cambridge. (originally published 2006 y.)
- 9 Harris K., Erickson G.L., Sikkenga S.L., Brentnall W.D., Aurrecoechea J.M., and Kubarysh K.G., Development of the Rhenium containing superalloy CMSX-4&CM186LC for single crystal blade and directionally solidified vane applications in advanced turbine engines. Superalloys. 1992. TMS. 1992. 297.
- 10 Kuznetsov, P.; Lesnikov, V.P.; Konakova, I.P.; Popov, N.A.; Kvasnitskaya, Y.G. Structural and phase transformations in single-crystal rhenium- and ruthenium-alloyed nickel alloy under testing for long-term strength. Met. Sci. Heat Treat. 2015, 57, 503–506. <https://doi.org/10.1007/s11041-015-9912-4>
- 11 X. Wu, S. K. Makineni, C. H. Liebscher, G. Dehm, and J. R. Mianroodi Unveiling the Re effect in Ni-based single crystal superalloys. Nature communications. 2020. 11: 389. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14062-9>
- 12 L. Ivaskevich, A. Balitskii, I. Kvasnytska, K. Kvasnytska, H. Myalnitsa Thermal Stability, Cyclic Durability and Hydrogen Resistance of Cast Nickel-cobalt Alloys for Gas Turbine Blades. CAMPE 2021: Advances in Mechanical and Power Engineering, pp 147–155 https://doi.org/10.1007/978-3-031-18487-1_15

- 13 Migas, D., Gradoń, P., Mikuszewski, T., & Moskal, G. (2020). Crystallization behavior of ternary γ - γ' Co-Al-W alloy. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-020-10279-9>
- 14 Korsmik, R., Turichin, G., Zadykhan, G., & Zhitenev, A. (2019). Investigation of Crystallization Process of a Single Crystal Nickel-Based Alloy during the Laser Multilayer Cladding. *Trans Tech Publications Ltd, Switzerland*, 822, 481–488.
- 15 Peachey, D. D., Carter, C. P., Garcia-Jimenez, A., Mukundan, A., Leonard, D. N., Charpagne, M.-A., & Cordero, Z. C. (2022). Directional recrystallization of an additively manufactured Ni-base superalloy. *Additive Manufacturing*, 60. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860422005875>
- 16 Zhang Weiguo, and LiuLin. Progress in directionally solidified superalloys. *Foundry*. 2009. 58(1):1.
- 17 Plancher E., Gravier aP., Chauvet E., Blandin J., Boller E., Martin G., Salvo L., Lhuissier P. Tracking pores during solidification of a Ni-based superalloy using 4D synchrotron microtomography. *Acta Materialia*, Vol. 181, December 2019, P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.09.040>
- 18 XU Qingyan, YANG Cong, YAN Xuwei, LIU Baicheng. Development of Numerical Simulation in Nickel-Based Superalloy Turbine Blade Directional Solidification. *Acta Metall Sin*, 2019, 55(9): 1175–1184. <https://doi.org/10.11900/0412.1961.2019.00126>
- 19 Giamei A.F., Tschinkel J.G. Liquid Metal Cooling: A New Solidification Technique. *Metallurgical Transction A*. 1976. Vol. 7A. P. 1427–1434.
- 20 Broomfield R.W., Ford D.A., Bhangu J.K., Thomas M. C., Frasier D. J., Burkholder P. S., Harris K., Erickson G. L., and Wahl J. B., Development and turbine performance of three advanced rhenium containing superalloys for single crystal and directionally solidified blades and vanes. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 1998. 120(7): 595.
- 21 Калюкин Ю.Н. Современные методы управления кристаллизацией турбинных лопаток из жаропрочных сплавов. *Газотурбинные технологии*. 2007. № 5. С. 6–11.
- 22 Harris K. J. B. Wahl Developments in superalloy castability and new applications for advanced superalloys. *Materials Science and Technology*. 2009. 25(2): 147–153. <https://doi.org/10.1179/174328408X355442>
- 23 Stanford N., Djakovic A., Shollock B., McLean M., D'Souza N., Jennings P. Seeding of single crystal superalloys. Role of seed melt-back on casting defects/2004, *Scripta Materialia* 50(1). P. 159–163. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2003.08.029>
- 24 Makineni, S.K.; Lenz, M.; Neumeier, S.; Spiecker, E.; Raabe, D.; Gault, B. Elemental segregation to antiphase boundaries in a crept CoNi-based single crystal superalloy. *Scr. Mater*. 2018, 157, 62–66. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.07.042>.
- 25 Dexin MA Novel casting processes for single-crystal turbine blades of superalloys. *Front. Mech. Eng*. 2018, Vol. 13 , 3–16. <https://doi.org/10.1007/s11465-018-0475-0>
- 26 Jian-Jun Xu , Yong-Qiang Chen. Steady spatially-periodic eutectic growth with the effect of triple point in directional solidification. // *Acta Materialia*, Volume Vol. 80, November 2014, Pages P. 220–238. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.06.047>
- 27 Ажажа В.М., Сverdlov В.Я., Ладыгин А.Н., Богуслаев А.В., Клочихин В.В., Лысенко Н.А. Перспективные направления в совершенствовании структуры монокристаллических лопаток газотурбинных двигателей. <http://ptsm.donntu.org/arhiv%20nambe/36%20pdf/003-009.pdf>
- 28 Гайдук С.В., Кононов В.В., Петрик И.А., Налесный Н.Б. Влияние скорости кристаллизации и термической обработки на структуру и свойства монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов. *Вестник двигателестроения*. 2005. № 1. С. 150–153.
- 29 Горічок І. В., Криськов Ц. А., Рачковський О. М., Фреїк Д. М., Люба Т.С. Пристрій зі змінним градієнтом температури в області кристалізації для вирощування кристалів з розплаву. Патент України 78465 (2013) <https://uapatents.com/5-78465-pristrijj-zi-zminnim-gradiehtom-temperaturi-v-oblasti-kristalizaci-dlya-viroshuvannya-kristaliv-z-rozplavu.html>

- 30 Plancher E., Gravier aP., Chauvet E., Blandin J., Boller E., Martin G., Salvo L., Lhuissier P. Tracking pores during solidification of a Ni-based superalloy using 4D synchrotron microtomography. *Acta Materialia*. Vol. 181, December 2019, P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.09.040>
- 31 Hengzhi Fu and Xingguo Geng. High rate directional solidification and its application in single crystal superalloys/Science and Technology of Advanced Materials.. *Adv. Mater.* 2 // 2001 197-204. [https://iopscience.iop.org/article/10.1016/S1468-6996\(01\)00049-3/pdf](https://iopscience.iop.org/article/10.1016/S1468-6996(01)00049-3/pdf)
- 32 Иванов В.Н., Казенов С.А., Курчман Б.С. и др. Литье по выплавляемым моделям / Под общ. ред. Шкленника Я.И., Озерова В.А. Москва: Машиностроение, 1984. 408 с.
- 33 Иванина Е.С., Батышев К.А. Модернизация установки УВНК-8П для направленной кристаллизации отливок из Ni-жаропрочных сплавов. *Литейное производство*. 2017. №1. С. 34–36.
- 34 Денисов А, Савин В, Зеленцов А., Авдюхин С. Монокристаллические турбинные лопатки. *Газотурбинные технологии*. Май-июнь 2000. С. 24–25.
- 35 Franke M.M., Hilbinger R.M., Lohmüller A., Singer R.F. The effect of liquid metal cooling on thermal gradients in directional solidification of superalloys: Thermal analysis. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 213, Issue 12 Issue 12, December 2013, P. 2081–2088. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.06.001>
- 36 Наумик В.В., Бялик Г.А. Упрощенный метод контроля загрязненности жидко-металлического кристаллизатора. *Вестник двигателестроения*. 2006. № 4. С. 123–125.
- 37 Жеманюк П.Д., Яценко В.К., Рубель О.В., Орлов М.Р. Регламентация выбора КГО лопаток турбины, полученных методом направленной кристаллизации. *Вестник двигателестроения*. 2002. № 1. С. 157–164.
- 38 Гранкин С.С., Свердлов В.Я. Исследование градиента температуры на фронте кристаллизации монокристаллов Ni-W-сплавов. *Вопросы атомной науки и техники*. 2008. № 1. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники (17). С. 162–165. http://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2008_1/article_2008_1_162.pdf
- 39 Stanford N., Djakovic A., Shollock B., McLean M., D'Souza N., Jennings P. Seeding of single crystal superalloys — Role of seed melt-back on casting defects/2004, *Scripta Materialia* 50(1). P. 159–163. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2003.08.029>
- 40 Konter M., Kats E., Hofmann N. A novel casting process for single crystal gas turbine components. *Superalloys*. 2000. P.189–200.
- 41 Krzysztof Kubiak, Dariusz Szeliga, Jan Sieniawski, Arkadiusz Onyszko, The Unidirectional Crystallization of Metals and Alloys (Turbine Blades). *Handbook of Crystal Growth* (Second Edition) 2015, P. 413–457. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63303-3.00011-0>
- 42 Jingying Xu a, Jinwu Kang b, Lele Zheng b c, Weimin Mao a, Jiwu Wang Numerical simulation of the directional solidification process with multi-shell mold being gradually immersed in water. *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 19, July–August 2022, Pages 2705-2716. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.037>
- 43 Pat. 6311760US, B22D27/04. Publ. 06.11.2001
- 44 Espacenet EP2921244A1. Method of the directional solidification of the castings of gas turbine blades and a device for producing the castings of gas turbine blades of the directional solidified and monocrystalline structure / A. Wiechczynski, M. Lisiewicz, J. Kwasnicka, and W. Kostrica. Application number EP 20150000675, 6.03.2015. Priority PL/13.03.14.

Надійшла 15.12.23

MANUFACTURING CASTINGS FROM HEAT-RESISTANT ALLOYS FOR CRITICAL PART

The development of the latest gas turbine engines (GTEs) requires improvements and innovations in production processes, including the introduction of advanced methods and processing tools that meet the growing standards of quality and operational reliability. The main causes of GTE failure are often related to wear or damage to key turbine elements, especially during operation in conditions of intense vibration, high temperatures, corrosive environments and abrasive wear. The article discusses modern solutions and manufacturing technologies of castings for parts of responsible purpose from heat-resistant alloys. The quality of castings depends on many factors, such as alloy composition, melting point, pouring speed, as well as the quality of the casting mold. Optimization of existing heat-resistant alloys is a necessity, as it is due to the increase in the resource and efficiency of the functioning of industrial equipment, such as gas turbine engines (GTE). The article considers the influence of various technological parameters on the quality of castings from heat-resistant alloys. A review of a number of scientific works and publications in the field of development and casting of heat-resistant alloys for parts of responsible purpose was carried out. Determined parameters that have a significant impact on the structural and phase characteristics of castings in the production of parts of responsible use from heat-resistant alloys by the method of directional hardening. In particular, the article analyzes in detail such aspects as the influence of the chemical composition of alloys on their heat resistance and resistance to oxidation, the role of heat treatment modes in the process of obtaining castings, as well as the importance of precise control of technological casting parameters. Special attention is paid to the newest methods of casting quality control. The effect of adding alloying elements on the properties of heat-resistant alloys and on the quality of final castings for complex-profile parts of gas turbines is also considered.

Keywords: Nickel-based superalloys, Gas turbine engines (GTE), blade, directional crystallization.

До уваги авторів

У зв'язку з переходом журналу «Процеси лиття» на новітню платформу Open Journal Systems та відповідним оновленням сайту журналу прохання при подачі статей користуватися сайтом <https://plit-periodical.org.ua/>

Після реєстрації в системі Вам буде запропоновано покрокову процедуру завантаження статті за стандартами міжнародних журналів.

Для спілкування з редакцією та подання статей у перехідний період користуйтеся тільки ел. адресою **plit.periodical@gmail.com**

Редакція журналу «Процеси лиття»