

Особливості термооброблення жароміцного нікелевого сплаву з орієнтованою структурою

І. І. Максюта, кандидат технічних наук
Ю. Г. Квасницька, кандидат технічних наук
О. В. Михнян, О. В. Нейма

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

З метою встановлення впливу режимів термообробки на склад та морфологію зміцнюючих фаз (γ' -фаза, карбіди), а також на експлуатаційні властивості в спрямовано закристалізованому стані, проведена серія експериментів з варіюванням температурно-часових режимів термообробки (гомогенізація та охолодження на повітрі) нового жароміцного сплаву типу ХН57КВТЮМ, комплекснолегованого ренієм та танталом. Запропонований режим термообробки завдяки позитивному впливу на ступінь впорядкованості, морфологію та кількість зміцнюючої дисперсної γ' -фази призводить до зростання експлуатаційних властивостей і довготривалої міцності зразків з нового сплаву.

Поліпшення структурно-фазової стабільності жароміцних сплавів для забезпечення надійної роботи лопаток стаціонарних та транспортних газотурбінних установок (ГТУ) при їх тривалій експлуатації (50 – 100 тис. годин при температурі 750 – 950 °С) в умовах впливу палива з агресивними домішками вимагає розробки як коректних методів визначення граничних умов їх легування, так і вибору температурно-часових параметрів термічної обробки. Це пов'язано з недопущенням виділення в процесі подальшої експлуатації литих виробів в аустенітній матриці поряд зі зміцнюючими дисперсними карбідними та інтерметалідними фазами (γ' -фаза – $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$), також і окрихчуючих топологічно щільно упакованих фаз (ТЩУ фази типу σ , μ) [1 – 4].

Відомо, що для виробів з багатокомпонентних жароміцних сучасних сплавів (так званих «суперсплавів» другого та третього покоління), призначених для складнопрофільних литих деталей газотурбінних двигунів (ГТД) з орієнтованою структурою (монокристалічною або спрямовано закристалізованою), вибір режимів термічної обробки ускладнюється порівняно зі сплавами для звичайних полікристалічних рівновісних виливків. Це пояснюється підвищенням вмістом таких тугоплавких елементів, як вольфрам, тантал, реній, що посилюють дендритну ліквідацію під впливом термічного градієнта під час кристалізації та термічної обробки. Також, оскільки в складі сплавів з монокристалічною структурою суттєво зменшено вміст таких елементів, як вуглець, бор, цирконій, гафній, що знижують температуру солідусу, то перший етап термообробки для виливків – гомогенізацію, логічно

проводити при температурі в межах інтервалу $\Delta T = T_s - T_{п.р.}$, де $T_{п.р.}$ – температура повного розчинення зміцнюючої γ' -фази, тобто треба досить ретельно вимірювати температури фазових перетворень. Також слід прийняти до уваги, що згідно [1 – 3] більш правильно цей інтервал термообробки в сплавах розглянутого типу визначати як різницю між температурою локального плавлення евтектики γ/γ' та температурою $T_{п.р.}$.

Метою даної роботи було встановлення впливу режимів термообробки на фазово-структурні характеристики (ступінь регулярності структури, морфологічні та кількісні характеристики зміцнюючих інтерметалідних та карбідних фаз) та на експлуатаційні властивості нового високохромистого жароміцного корозійностійкого сплаву типу ХН57КВТЮМ, додатково легованого ренієм та танталом, що розроблений у ФТІМС НАНУ сумісно з ДП НВКГ «Зоря» – «Машпроект», (м. Миколаїв), для отримання складнопрофільних деталей ГТД з орієнтованою структурою [5, 6]. Необхідність проведення комплексу досліджень пояснюється тим, що до теперішнього часу не можливо було знайти літературні дані, які б свідчили про конкретні термодинамічні параметри процесу гомогенізації та загартування у високохромистих (16 – 20 % Cr) нікелевих композиціях з орієнтованою структурою, які вміщують реній та тантал.

Хімічний склад модельних виливків контролювали за стандартними методиками аналітичної хімії та хіміко-спектральним методом з точністю $\pm 0,001$ %. Дослідження макро- та мікроструктури проводили за методиками, що подані у роботах [5, 6]; форму частинок γ' -фази та карбідів, характер їх розподілу вивчали на електронному мікроскопі на одноступінчастих вугільних репліках методом екстрагування фаз.

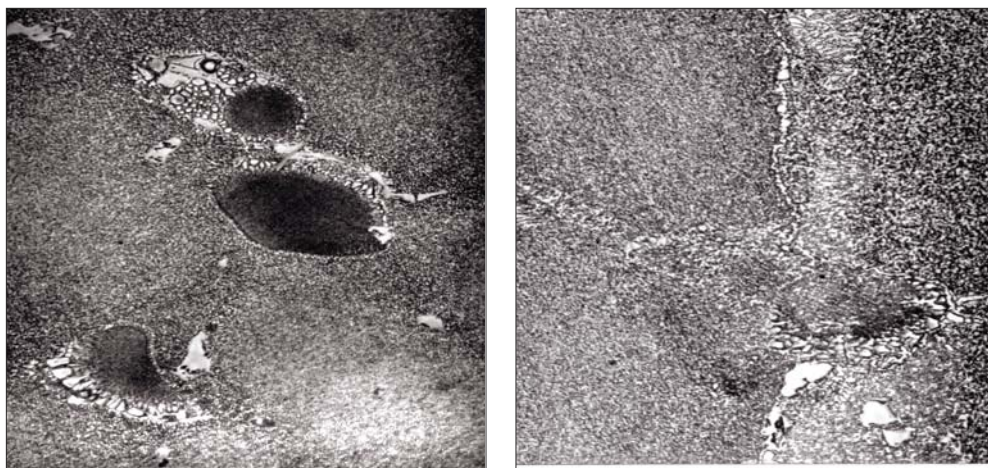
Виливки з модельних сплавів отримували шляхом вакуумно-індукційного переплаву чистих шихтових матеріалів у зливок у вакуумно-індукційній печі УППФ-2 з наступним переплавом методом спрямованої кристалізації у промисловій горизонтальній вакуумній печі УВНК-8П в умовах комбінованого (радіаційного та конвективного) охолодження форми (розплав алюмінію) при швидкості кристалізації $V_{кр.} = 5$ мм/хв.

У досліджуваних типах сплавів температуру та тривалість гомогенізації вибирали з урахуванням декількох факторів: рівнем T_s , T_L , $T_{п.р.}$ у відповідності з даними, отриманими методом ВДТА [5], та необхідністю запобігання реакціям, що призводять до появи шкідливих окрихчуючих фаз [4]. Відзначимо, що переважне розчинення ренію та танталу в аустенитній матриці сплаву знижує швидкість дифузійних процесів, тим самим гальмуючи розчинення і коагуляцію первинної γ' -фази, тому може виникнути необхідність збільшення часу першого етапу термообробки. Такого роду вплив тугоплавких елементів є суттєво позитивним, тому що стримує процеси, які контролюють знеміцнення металу в умовах високотемпературної повзучості.

Головною метою процесу гомогенізації, необхідної для зростання експлуатаційних характеристик сплавів даного типу, є розчинення нерівноважних об'ємних сегрегацій евтектики γ/γ' та подальше виділення вторинної, більш дисперсної та рівномірно розподіленої γ' -фази переважно

кубічної морфології в аустенітній матриці. Згідно літературним даним [4] та власним дослідженням авторів, така морфологія і для звичайних полікристалічних і для орієнтованих структур є найбільш сприятливою для гальмування процесів повзучості. Тривалість процесу гомогенізації залежить також від дендритних відстаней в сплаві після спрямованої кристалізації, що здійснювали згідно попередньо вибраного режиму [5]. Чим нижче значення λ і чим менші об'ємні островці γ/γ' , тим коротший проміжок часу потрібен для гомогенізації. З урахуванням власних, отриманих методом ВДТА, та літературних даних [1 – 3] значень з температур та кінетики фазових перетворень, були вибрані та випробувані режими гомогенізації тривалістю 2,5 і 3,0 години при температурі 1210 ± 5 °С.

Порівняльними металографічними дослідженнями встановлено, що ефективною слід вважати витримку 3 години, оскільки за 2,5 год не відбулося достатньо помітного, у порівнянні з литим станом, розчинення островків γ/γ' евтектики. Так, до термообробки, об'ємна частка евтектики становила 2,5 – 3,0 %, а після тригодинної гомогенізації – 1,5 – 2,0 %, (об'ємних), а середній діаметр островців γ/γ' -фази зменшувався до 15 – 20 мкм у порівнянні з 18 – 25 мкм у вихідному стані до термообробки та після витримки 2,5 год (рис. 1). Слід зазначити, що процес фрагментування γ/γ' евтектики порушує неперервність границь розділу «островків» евтектики та γ -твердого розчину і тим самим знижує імовірність розвитку зерногранічних тріщин. Одночасно спостерігалось і підвищення об'ємної частки вторинної дисперсної γ' -фази, супроводжуване подрібненням її часток до 0,2 – 0,5 мкм у порівнянні з вихідним станом (рис. 2), що є сприятливим для дисперсійного зміцнення сплаву.



а

б

Рис. 1. Мікроструктура модельного сплаву XH57KBTYOM. а – литий стан, б – термооброблений стан. х5000.

Відомо, що критичним параметром ефективності термічної обробки є також швидкість охолодження від температури гомогенізації. На практиці, згідно даних літератури [1 – 3] для сплавів розглянутого типу з орієнтованою

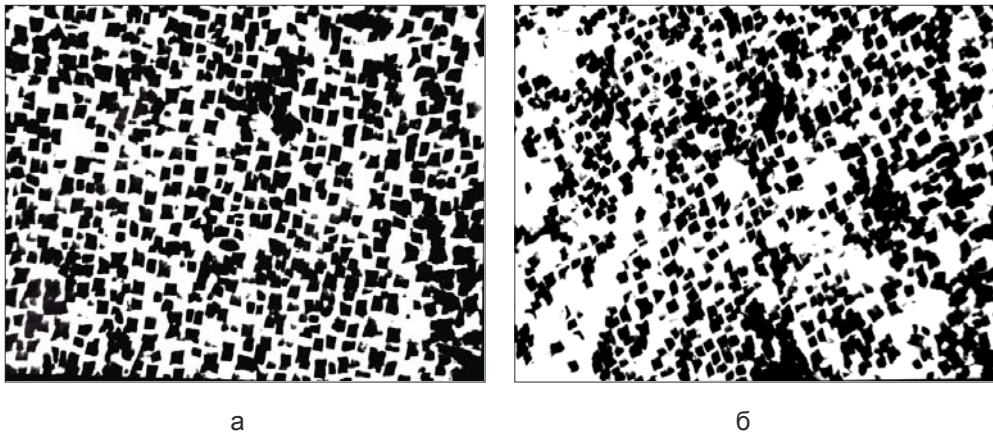


Рис. 2. Виділення γ' -фази у модельному сплавi ХН57КВТЮМ. а – литий стан, б – термооброблений стан. x5000.

структурою застосовують як досить високі (більше 100 град/хв) швидкості охолодження, так і повільне охолодження на повітрі, як у нашому випадку. Крім того, після термообробки за вибраним режимом відбувається не тільки значне вирівнювання за даними МРСА хімічного складу сплаву у цілому, зменшення неоднорідності за розміром та за щільністю розподілу γ' -фази в осях та міжосних ділянках дендритів, також, за даними МРСА, змінюється склад γ (зростає масова частка ренію) та γ' - фази (збільшується масова частка танталу) з одночасним зростанням масової частки γ' -фази від 58 (литий стан) до 65 % (рис. 2). Слід зазначити, що зміцнююча карбідна фаза, яка представлена карбідами MeC на основі $(Ti, Ta)C$ та $Me_{23}C_6$ на основі Cr (дані МРСА та рентгеноструктурного аналізу), що виділяються з розплаву у міжосьовому просторі поблизу температури солідус, не виявила після гомогенізації помітних змін щодо складу, морфології та кількості, що є ознакою її високотемпературної стабільності.

Для зразків модельного складу, легованих ренієм та танталом, та базового сплаву типу ХН57КВТЮМ були проведені випробування основних механічних характеристик згідно параметрів, передбачених для сплавів розглянутого типу галузевою нормативною документацією (таблиця).

Механічні властивості та довготривала міцність модельного сплаву

Стан вилівка	Механічні властивості при температурі 600 °С			Довготривала міцність при температурі 900 °С, $\sigma = 280$ МПа		
	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	τ , час	δ , %	ψ , %
Литий (ВІП)	720	15,0	38,0	108	10,6	18,0
Спрямовано кристалізований (ВІП + СК)	734	14,6	32,0	112	8,9	19,0
ВІП + СК + Т/О	742	15,2	36,0	120	10,6	18,0

Аналізуючи результати проведених досліджень, пов'язаних з вибором режимів термічної обробки для нової композиції спрямовано кристалізованого жароміцного нікелевого сплаву, комплекснолегованого ренієм та танталом, можна зробити такі висновки.

Одноступеневий режим гомогенізації (3,0 год при $T = 1210 \pm 5$ °С, охолодження на повітрі) ефективно знижує параметри дендритної комірки, зменшує рівень ліквіаційної неоднорідності сплаву, сприяє подрібненню сегрегацій евтектичної γ/γ' -фази, призводить до розчинення первинної та виділення більш диспергованої та рівномірно розподіленої вторинної зміцнюючої γ' -фази кубічної морфології.

Після термообробки спостерігається збільшення кількості ренію в аустенітній матриці, що стримує процеси дифузійного розміщення, також збільшується кількість танталу в γ -фазі, що призводить до підвищення T п.р., тим самим збільшуючи температурну роботоспроможність сплаву.

В результаті гомогенізації спостерігається формування більш фрагментованих зубчастих границь евтектичних виділень γ/γ' -фази, які додатково гальмують процеси повзучості.

В цілому можна констатувати, що усі вищезазначені фазово-структурні перетворення після термообробки за вказаним режимом, позитивно впливають на зростання (на 8 – 11 %) основної експлуатаційної характеристики лопаток ГТД – рівня довготривалої міцності зразків з нового складу сплаву ХН57КМЮВТ, комплекснолегованого ренієм та танталом.

Література

1. Симс Ч.Т., Столофф Н.С., Хагель У.К. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок. Т.1. – М.: Металлургия, 1995. – 384 с.
2. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей. – М.: МИСИС, 2001. – 632 с.
3. Яцык С.И. Производство высокотемпературных литых лопаток авиационных двигателей. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.
4. Максютя И.И., Квасницкая Ю.Г., Мьяльница Г.Ф. Обеспечение фазово-структурной стабильности высокохромистых жаропрочных сплавов для лопаток ГТУ // Металл и литье Украины. – 2012. – № 11. – С. 16 – 20.
5. Мьяльница Г.Ф., Максютя И.И., Квасницкая Ю.Г. Получение ориентированной структуры в отливках из жаропрочного никелевого сплава, легированного ренієм // Процессы литья. – 2012. – № 6. – С. 54 – 63.
6. Мьяльница Г.П., Максютя І.І., Квасницка Ю.Г. Вибір легуючого комплексу нового корозійностійкого сплаву для соплових лопаток ГТД // Металознавство та обробка металів. – 2013. – № 2. – С. 29 – 34.
7. Королева М.М., Лобашев А.Г., Шевелев Ю.П. Организация режимов высокоскоростной направленной кристаллизации газотурбинных лопаток // Литейн. пр-во. – 2001. – № 2. – С. 24 – 27.

Одержано 12.11.13

И. И. Максюта, Ю. Г. Квасницкая, Е. В. Михнян, А. В. Нейма

Особенности термообработки жаропрочного никелевого сплава с ориентированной структурой

Резюме

В данной работе с целью установления влияния термообработки на состав и морфологию упрочняющих фаз (γ' -фаза, карбиды), а также на эксплуатационные свойства сплава в направленно закристаллизованном состоянии, проведена серия экспериментов с варьированием температурно-временных режимов термообработки (гомогенизация и охлаждение на воздухе) нового жаропрочного сплава типа ХН57КВТЮМ, комплекснолегированного рением и танталом, который разработан во ФТИМС НАН Украины совместно с ГП НПКГ «Зоря» – «Машпроект». Показано, что предложенный режим термообработки благодаря положительному влиянию на степень упорядоченности, морфологию и количество упрочняющей дисперсной γ' -фазы, приводит к росту эксплуатационных свойств и длительной прочности образцов из нового сплава.

I. I. Maksuita, Yu. G. Kvasnitskaya, E. V. Mihnyan, A. V. Neima

The features of heat treatment of heat-resistant nickel alloy with oriented structure

Summary

In this paper, in order to establish the influence of heat treatment to the structure and morphology of hardening phases (γ' -phase carbides), as well as to the performance properties of alloy in directly solidificated condition, the series of experiments with varying temperature and time regimes of heat treatment (homogenization and air cooling) of a new type of high-temperature ХН57КВТЮМ alloys alloyed with rhenium and tantalum, developed in PTIMA NAS Ukraine together with “Zorya” – “Mashproekt” has been held. It is shown that the proposed mode of treatment, due to the positive impact on the degree of ordering, morphology and dispersion of strengthening γ' -phase, lead to an increase in operating properties, and most importantly, long-term durability of the samples of new alloy.