УДК 620.19: 621.31

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ Ni-Cr С КОМПОЗИЦИОННЫМ ПОКРЫТИЕМ

[1] Скаков М.К., [2] Жилкашинова Ас.М., [3] Градобоев А.В., [2] Жилкашинова Ал.М., [2] Абилев М.Б.

[1] Восточно-Казахстанский университет им. С. Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан
[2] Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан
[3] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: asssel2462@mail.ru

В статье описан способ изготовления образцов жаропрочного сплава на никелевой основе с последующим нанесением композиционного покрытия на основе (Cr-Al-Co-редкоземельная группа), полученного плазменным методом. Получены модельные жаропрочные сплавы на основе Ni-Cr (20Х23Н18) с заданной структурой. Изготовление опытных отливок 20Х23Н18 включало следующие операции: нагрев мерной шихтовой заготовки готового сплава; нагрев до температуры 1600 °С и расплавление металла в вакууме 10^{-2}–10^{-4} Па.; заливка образца в форму при температуре металла 1480–1530 °С, температура формы при этом составляла 950-1000°С. Произведены расчеты и математическая модель процесса формирования слитка, отражающая последовательности кристаллизации и непрерывность питания объема по высоте, температурное поле составной оболочки. Разработанная математическая модель показала, что в процессе производства слитков заливка расплава должна производиться при постоянном его уровне в воронке. Поэтому заполнение металлом изложницы рассматривалось как истечение жидкости из одного сосуда в другой с постоянным и переменным уровнем. Время заполнения изложницы определено как величина расхода при течении расплава через керамику литейного припаса. Предложена ионно-плазменная технология двухслойного покрытия с внутренним металлическим и внешним керамическим слоями на подготовленной поверхности матрицы жаропрочного сплава 20Х23Н18: Cr/Al/Co (поочередное нанесение слоев) + ZrO_2-Y_2O_3. Общая толщина двухслойного теплозащитного покрытия составила 180–190 мкм. Общая толщина внутреннего слоя (Cr/Al/Co) – 60–65 мкм с содержанием Al – 30–35% масс., Cr – 40–44% масс., Co – 30–34% масс. Толщина внешнего керамического покрытия составила (ZrO_2-Y_2O_3)120-130 мкм, концентрация оксида иттрия и оксида циркония в жаростойком слое составила соответственно 40-43% масс., 60-63% масс. Нанесение покрытий осуществляли на ионно-плазменной установке, представляющей собой вакуумную камеру с двумя магнетронными распылительными системами несбалансированного типа и ионный источник с замкнутым дрейфом электронов.

Введение

Имеется ряд работ, посвященных изучению лопастей турбин, выработавших свой срок службы, который может составлять от 150 до 350 тысяч часов работы [1–3]. В авиадвигателестроении наиболее широко применяются сплавы Ni-Cr-Al, несмотря на то, что сплавы системы Ni-Cr-Al обладают высокой жаростойкостью, этого, однако, недостаточно [4]. Для турбинных лопаток требуются покрытия, которые способны длительно работать под нагрузкой при температуре металла вплоть до 1150–1200 °С. Один из способов решения данной проблемы – создание комбинированных металлических и металлокерамических высокотемпературных покрытий.

В настоящее время поиски новых высокотемпературных покрытий связаны прежде всего с оптимизацией химического состава новых композиций, с разработкой и освоением новых технологических процессов, основанных на использовании новых физических эффектов, а также с применением вновь создаваемых покрытий [5–7]. Часто базовой системой жаростойких покрытий является Me-Cr-Al, где в качестве Me выступают Fe, Co, Ni.

При длительном воздействии высоких температур (≥100 ч) под покрытием на глубину до нескольких сотен микрометров формируется ярко выраженная зона диффузионного взаимодействия (вторичная реакционная зона на основе направленных поперек границы сплав/покрытие крайне нежелательных топологически плотноупакованных фаз пластинчатой формы, разупрочняющих материал лопаток [8–10].

Известен способ получения износостойкого покрытия, включающий вакуумное ионно-плазменное нанесение покрытия на основе сложного нитрида титана-хрома-циркония. В качестве дополнительных компонентов используют алюминий и ниобий в количестве 1–5 ат.% и содержание циркония более 5 ат.%, нанесение покрытия осуществляют с помощью расположенных горизонтально в одной плоскости трех дуговых испарителей, подключенных к сепаратору капельной фазы, следующих составов: титан-алюминиевый катод из сплава ВТ-5, комбинированный цирконий-ниобиевый катод и хромовый катод [11].

Поскольку важным требованием, предъявляемым к жаропрочности является термостабильность сплава-подложки, обеспечивающая ресурс и надежность готовых изделий, то технология выплавки жаропрочных сплавов на никелевой основе с заданной структурой позволяет достичь большего упрочняющего эффекта за счет γ’-фаз и карбидов, более высокой структурной стабильности. Однако, до сих пор при-

менение теплозащитных многослойных покрытий не позволяют в полной мере решить проблему снижения температуры деталей турбин в условиях высоких температур. Это связано с недостаточной теплопроводностью керамики, что не позволяет эффективно изолировать компоненты турбины двигателя от температур, превышающих критические для конкретного сплава. При нанесении таких покрытий необходимо обеспечить высокую адгезию покрытия и материала лопатки, поэтому при их конструировании необходимо применять нанесение нескольких слоев (керамического и металлического). Кроме того, использование ионно-плазменных технологий формирования структуры керамического слоя позволят обеспечить необходимый уровень термической стойкости внешнего слоя в зависимости от условий работы в процессе быстрого изменения температур на поверхности деталей турбины в совокупности с жаростойким подслоем.

Целью настоящей работы является разработка и исследование способа изготовления образцов жаропрочного сплавана никель-хромовой основе с последующим нанесением плазменным методом композиционного покрытия на основе (Cr-Al-Co-редкоземельная группа).

Материал и методы исследования

Для отработки комплексной технологии повышения ресурса работы лопаток турбин необходимо изготовить ряд модельных образцов жаропрочного сплава на основе Ni-Cr (20Х23Н18). Данный сплав получали методом вакуумной индукционной плавки слитка в цилиндрическую изложницу. Образцы сплавов получали на базе Национальной научной лаборатории коллективного пользования ВКУ им. С. Аманжолова. Нагрев мерной шихтовой заготовки готового сплава производили в установке типа УППФ-4. Замер температуры жидкого металла в ходе плавки осуществляли оптическим пирометром и погружной термопарой ВР5/20. Электропитание индукторов установки производили от тиристорных преобразователей ТПЧ-120, мощностью соответственно 120 кВт. Необходимо отметить, что конструкция УППФ-4 выполнена с системой автоматизированного управления процессом плавки, заливки и работой установки в соответствии с циклограммой, учитывающей запрограммированную технологию плавки и заливки расплава в изложницу. Операцию отрезания прибыльной и донной части слитка производили на абразивно-отрезном станке, модернизированной модели универсального фрезерного станка марки ZAYER 1000 AM. При резке слитка во избежание загрязнений жидким стеклом, применяли водосмешиваемую смазочно-охлаждающую жидкость, представляющую собой смесь минерального масла, эмульгаторов, высокоэффективных пеногасителей, биостатических присадок и пр., марки «Вольгол-304».

Химический состав полученного сплава был определен на оптико-эмиссионном спектрометре *SPECTROMAXx (SPECTRO Analytical Instruments GmbH, Германия).* Цифровой искровой генератор позволяет создавать искру повышенной энергии (метод HEPS) при подготовке образца к анализу для устранения влияния структуры. Частота тока в искре составляет от 50 до 1000 Гц. Анализируемые образцы устанавливаются на массивный стол. Благодаря большой массе стола, измерения проводятся без дополнительного охлаждения. Штыревой электрод имеет специальную конструкцию, что позволяет резко снизить эффект загрязнения образца материалом предыдущей пробы. В спектрометре SPECTROLAB (спектральный диапазон от 120 до 780 нм) может быть установлено до 108 спектральных каналов с фотоумножителями на один спектрометр и до 128 спектральных каналов на CCD-детекторах на каждую из программ спектрометра в варианте с гибридной оптической системой.

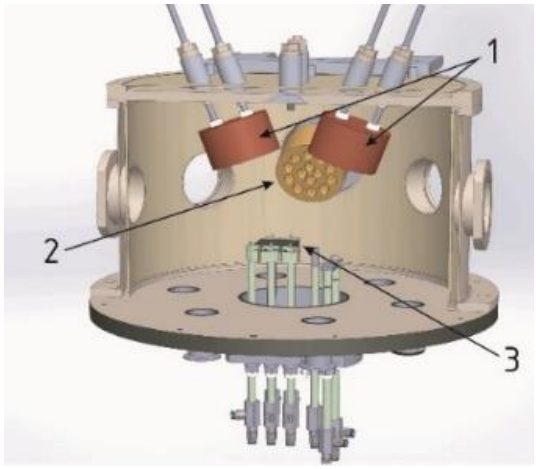
Для подтверждения соответствия полученного жаропрочного сплава требованиям ГОСТ 5632-72 «Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки», предъявляемым к стали 20Х23Н18, заготовки подвергали деформации методом прокатки на прокатном стане лаборатории. Испытания проводили на экспериментальной базе Национальной научной лаборатории ВКУ им. С. Аманжолова.

Были приготовлены образцы из полученного жаропрочного сплава в состоянии отливки. Образцы нарезались размерами 50×50×3 мм, а их поверхность обрабатывали по струйно-абразивной методике.

В качестве исходного сырья для приготовления мишени плазменного напыления использовали коммерческие порошковые материалы фракцией 15–60 мкм: Co ПК-1, Al АПЖ, Cr ЭРХ-0, Y_2O_3, ZrO_2. При изготовлении мишеней в качестве связующей жидкости использовали 1%-й поливиниловый спирт. Далее порошок перетирали в шаровой мельнице *PULVERISETTE 6* в течении 2,5 часа при 420–520 об/мин и перемешивали механической мешалкой в течение 1,5 часа. Порошки Cr/Al/Co перетирали каждый по отдельности для усредненной однородной гомогенизации и дисперсности с возможностью последующего поочередного нанесения каждого из порошков. Порошковые материалы ZrO_2-Y_2O_3 измельчали в мельнице одним составом. Формовка мишеней производилась в виде дисков диаметром 240 мм и толщиной 7,5–8 мм. Формование проводили в лабораторной пресс-форме путем одноосного прессования при давлении 60 МПа. Через сутки мишень отжигалась на воздухе при температуре 1050 °С в течение 1,2 часа. В качестве подложки для нанесения покрытий использовались пластины размером 50×50×3 мм из полученных нами модельных образцов сплава 20Х23Н18.

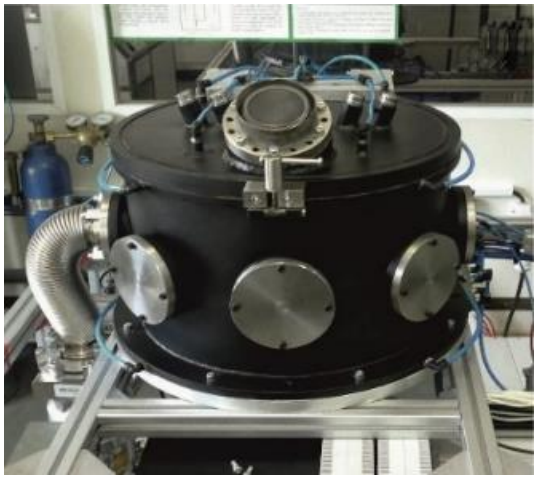
Ионно-плазменная установка для нанесения покрытий представляет собой вакуумную камеру с двумя магнетронными распылительными системами не-

сбалансированного типа и ионный источник с замкнутым дрейфом электронов. Экспериментальные исследования по нанесению покрытий проводили на базе лаборатории Национального исследовательского Томского политехнического университета (Россия) на основании договора о научно-техническом сотрудничестве. Вакуумная камера установки представляет собой герметичный объем диаметром 500 мм и высотой 300 мм, оснащенный фланцами различных диаметров для подключения вакуумной арматуры, датчиков вакуума и иных необходимых устройств (рисунок 1) [12].



1 – магнетронные распылительные системы;
2 – ионный источник с замкнутым дрейфом электронов;
3 – подложкодержатель с функцией нагрева

а)



б)

Рисунок 1. Схема (а) и внешний вид (б) ионно-плазменной установки:

Система подачи и регулировки газа представлена прецизионными регуляторами массового расхода *Bronkhorst ELFLOW* с точностью регулировки 0,01 мл/мин. Контроль температуры образцов осуществляется за счет хромель-алюмелевой термопары (диапазон измеряемых температур 200–1100 °С). Метод получения покрытий основан на вакуумном осаждении из плазмы магнетронного разряда. Создавались у поверхности мишени магнетрона ловушки для электронов за счёт наличия скрещенных электрических и магнитных полей. Электроны имеют сложную и длинную траекторию движения и, таким образом, достигается высокая вероятность ионизации атомов рабочего газа. Ионы, ускоренные в электрическом поле, распыляют мишень, а наличие магнитного поля позволяет удерживать плазму вблизи неё.

Перед напылением покрытий рабочий объем вакуумной камеры откачивался до давления 10^{-4} Па, затем осуществлялась подача рабочего газа, после достижении рабочего давления зажигался разряд. Для экспериментов, независимо от состава плазмообразующего газа, установлен следующий температурный режим напыления: темп роста температуры на начальном этапе напыления 3,0 °С/мин, температура подложки через 1,7 часа составила 240–260 °С. Давление рабочего газа (аргона) составила (0,4 Па), и расстояние мишень-подложка 37–40 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Как известно, стабильные антикоррозионные свойства при повышенных температурах (даже для смесей кислот HCl; H_2SO_4; HNO_3; HF и др.) имеют сплавы на основе Ni-Cr (Mo; Fe; Cu и др.) [2–4]. Это частично обусловлено способностью никеля растворять в большом количестве легирующие элементы, такие как Cr, Mo, а также Fe, Cu. Хром в никелевых сплавах, а молибден в никелево-молибденовых сплавах тормозят активное растворение никелевой основы, хотя Cr обеспечивает ее пассивность, а Mo затрудняет. Благодаря этим свойствам Ni-Cr сплавы устойчивы в окислительных средах. Жаропрочный сплав 20Х23Н18 применяется в качестве работающих и направляющих лопаток турбин, поковок и бандажей, работающих при температуре 650-700 ºС, детали камер сгорания, работающие при 1020–1100 ºС.

При разработке способа получения модельных образцов сплава на основе Ni-Cr (20Х23Н18) было уделено пристальное внимание, поскольку получение стабильной жаропрочной матрицы для нанесения покрытий является важной частью общего технологического процесса. Естественно ожидать, что на структуре покрытия отражается и специфика подложки, прежде всего ее кристаллическая структура. Так, например, рост алюмохромного слоя может быть в той или иной мере связан с ориентацией подложки.

Изготовление опытных отливок из сплава 20Х23Н18 включала следующие операции:

– нагрев мерной шихтовой заготовки готового сплава. Металл помещали в плавильный быстросменный набивной тигель из оксида алюминия Al_2O_3, прошедший предварительное спекание с помощью графитового шаблона;

– расплавление металла и его нагрев до температуры 1600 °С производили в вакууме 10^{-2}–10^{-4} Па.

Выдержка при температуре максимального нагрева составила не более 5 минут;

– заливка образца в форму производилась при температуре металла 1480–1530 °С, температура формы при этом составляла 950–1000 °С.

В схеме процесса формирования слитка мы использовали принцип суперпозиции: 1) выливание расплава из тигля; 2) как следствие, падение температуры расплава в разливочной воронке, так как часть тепла расходуется на прогрев керамики; 3) уменьшается температура в струе расплава пропорционально высоте падения; 4) уменьшение температуры, связанное с прогревом изложницы; 5) кристаллизация расплава, в отдельно взятых малых объемах, обусловленная разностью температур.

В таком случае, математическая модель этапов заполнения и кристаллизации слитка может быть представлена следующей системой уравнений тепловых балансов, которые учитывают данные процессы [13]:

$$\begin{cases} \int_{k=1}^{5} Q' = \sum_{k=1}^{5}\sum_{j=1}^{p} Q_{k,j} \\ \sum_{i=1}^{n+1}\left(Q'' + Q_з\right) = \sum_{i=1}^{n+1} Q \sum_{r=1}^{m} Q_{i,r} \end{cases}, \quad (1)$$

где $\sum Q', \sum\left(Q' + Q_з\right)$ – это изменение теплосодержания движущегося металла, заполнившего фиксированный объём в изложнице и прибыли, Дж; k – участки движения расплава; p – схема теплообмена потока сплава с контактирующей средой; r – схема теплообмена расплава с контактирующей средой при его кристаллизации; $(n+1)(\mathrm{n}+1)$ – количество фиксированных объемов по высоте изложницы с прибыльной надставкой; m – схема теплообмена малых объемов расплава с контактирующей средой при их кристаллизации.

В процессе заполнения расплавом изложницы происходит постепенное его охлаждение относительно исходной температуры начала заливки. Снижение температуры расплава происходит по следующим причинам: тепловые потери в струе металла вследствие теплового излучения при заливке из тигля; при достижении расплава керамической воронки происходит дальнейшее его охлаждение за счет теплообмена с воронкой; с открытой поверхности расплава в воронке, в течение всего периода заливки происходит понижение температуры за счет теплового излучения; под действием гравитационных сил, при достижении расплавом дна керамического стакана, формируется струя металла, обеспечивающая заполнение полости изложницы.

Уравнение теплового баланса расплава при заполнении им изложницы в соответствии с рассмотренными выше этапами можно записать в следующем виде:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \quad (2)$$

где Q – суммарное изменение теплового содержания расплава, Дж; $Q_1 Q_1$ – количество теплоты, передаваемое от поверхности струи в окружающее пространство при течении расплава из тигля, Дж; Q_2 – количество теплоты, отведенное с поверхности металла в воронке окружающему пространству индукционной печи, Дж; Q_3 – количество теплоты, поглощаемое керамикой литейного припаса, Дж; Q_4 – количество теплоты, передаваемое с поверхности струи расплава в окружающее пространство при заполнении изложницы, Дж; Q_5 – количество теплоты, переданное в стенки изложницы, Дж.

Для решения этой задачи предварительно производим декомпозицию слитка на фиксированные объемы по высоте (рисунок 2).

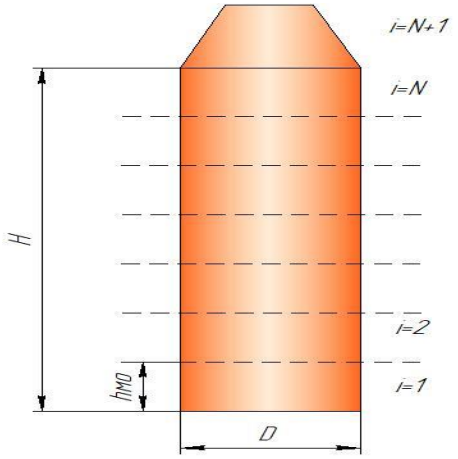


Рисунок 2. Декомпозиция слитка на фиксированные объемы

Таким образом, необходима математическая модель последовательности кристаллизации и непрерывность питания объемов по высоте. Вышележащий слой, по отношению к нижележащему фактически является прибылью. Тогда высота каждого слоя должна быть выбрана из условия зоны действия прибыльной части.

В процессе производства слитков заливка расплава производится при постоянном его уровне в воронке, поэтому заполнение металлом изложницы можно рассмотреть как истечение жидкости из одного сосуда в другой с постоянным и переменным уровнем. В свою очередь, время заполнения изложницы может быть определено как величина расхода при течении расплава через керамику литейного припаса.

Для расчетов заполнения формы в литейной гидравлике величина расхода при верхней заливке может быть определена как [13]:

$$Q = \mu S\sqrt{2gH}, \quad (3)$$

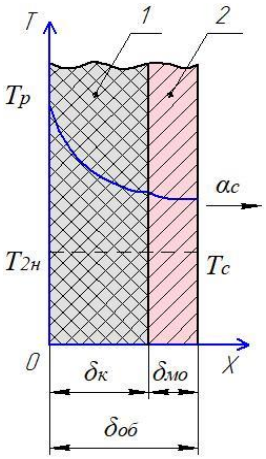
где Q – расход расплава при истечении, м^2/с; μ – коэффициент расхода; S – площадь поперечного сечения канала, м^2; H – гидростатический напор, м; g – ускорение силы тяжести, м^2/с. Коэффициент рас-

хода литниковой системы (μ) определяется потерями напора и описывается соотношением [13]:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1+\sum \varepsilon_i}}, \quad (4)$$

где $\sum \varepsilon_i$ – сумма потерь напора расплава в литниковой системе.

Математическая модель температурного поля составной оболочки из литейного припаса и металлической обечайки представлена на рисунке 3.



1 – керамическая оболочка; 2 – стальная обечайка

Рисунок 3. Схема распределения температуры в составной оболочке литейного припаса

Химический состав полученного сплава приведен в таблице 1. Получение заданного химического состава сплава обеспечивается благодаря конструкции вакуумной системы, исключающей попадание загрязнений при откачке аргона, подаваемого в плавильную камеру. Узел поворота тигля оснащен механизмом регулирования скорости слива расплава и последующего возврата печи подогрева формы из плавильной камеры в шлюзовую, т.е. сразу после полного слива металла и возврата тигля в исходное положение. Конструкция индуктора и нагревателей в печи подогрева формы позволяет регулировать перепад температуры по высоте печи, обеспечивая возможность направленного затвердевания отливки в литейном блоке (изложнице). Камера загрузки тигля шихтой отделена от плавильной камеры шлюзовым затвором, такая конструкция позволяет совместить во времени операции загрузки шихты, взятие пробы на химический анализ в процессе плавки, подшихтовка плавки модификаторами.

Таким образом, методом вакуумной индукционной плавки слитка в цилиндрическую изложницу, нами был получен цилиндрический слиток диаметром – 120 мм, длиной – 400 мм. Далее, слиток подвергали механической обработке.

Согласно технологической цепочке, после анализа химического состава сплава, слиток подвергли удалению прибыльной и донной частей и провели механическую обработку припуска по диаметру. Согласно расчетной норме на припуск, токарная обработка по диаметру слитка, до момента фактического удаления поверхностных дефектов составила 4% или 3 мм на диаметр. После механической обработки по диаметру, для дальнейших исследований литую заготовку подвергали резке по плоскости на прямоугольные пластины размером 50×50×3 мм.

Таблица 1. Химический состав серийного жарочного сплава и полученного экспериментального образца 20Х23Н18

	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr
Требования ГОСТ 5632-72	до 0,2	до 1,0	до 2,0	17–20	до 0,02	до 0,0035	22–25
Полученный образец	0,15	0,91	1,95	18,65	0,015	0,0019	23,55

Для подтверждения соответствия полученного нами жаропрочного сплава требованиям ГОСТ 5632-72 «Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки», предъявляемым к стали 20Х23Н18, заготовки подвергали деформации на лабораторном прокатном стане. Начальная толщина заготовки деформации методом прокатки составляла 10,0 мм, толщина после прокатки – по 1,0 мм за проход, достигла 6,0 мм, степень обжатия – 40%. Прокатанную заготовку подвергали термической обработке в муфельной печи, согласно режиму – закалка 1050 ºС, охлаждение – вода. Сравнительный анализ механических свойств полученных образцов, в сравнение с требованиями ГОСТ 5632-72 приведен в таблице 2. Вырезка образцов для исследования механических свойств производилась в продольном сечении заготовки, относительно прокатки.

Таблица 2. Механические свойства стали 20Х23Н18 при Т=20 °С (требования ГОСТ 5632-72) в сравнении с экспериментальным образцом

Сортамент	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ_5, %	Термообработка
Лист тонкий ГОСТ 5582-75	510	245	35	закалка 1080–1150 ºС, охлаждение – вода
Экспериментальный образец	512	245	37	закалка 1050 ºС, охлаждение – вода

Как известно, технология производства турбинных лопаток газотурбинного двигателя включает в себя не только производство жаропрочного сплава, но и нанесение на поверхность жаростойких покрытий. Как правило, это покрытия на основе Al-Cr. Различные комбинации третьих элементов – кремния, кобальт, редкоземельные и т.п. приводят к улучшению характеристик покрытия [8–10]. Кроме того, Al-Cr покрытия на жаропрочных никелевых сплавах широко применяют для защиты от газовой коррозии ответственных деталей газотурбинных двигателей. В состав покрытий, наряду с алюминием, могут входить и другие легирующие добавки, снижающие ско-

рость окисления и влияющие на процессы диффузионного взаимодействия покрытия с основой жаропрочных сплавов. Однако, в процессе эксплуатации в результате окисления и диффузионного перераспределения алюминия в матрицу, его содержание в покрытии постепенно уменьшается, изменяется фазовый состав покрытия и состав защитных оксидов.

Для предотвращения или снижения интенсивности процесса формирования вторичной реакционной зоны нами предложен ряд технических решений, которые могут способствовать выравниванию элементного состава поверхностного слоя жаропрочного сплава: нанесение поочередно на поверхность сплава перед формированием жаростойкого покрытия слои чистых металлов – Cr и Al и Co, проводить проведение вакуумной термической обработки, формирование на границе сплава с покрытием барьерного слоя, препятствующего развитию процессов диффузионного обмена легирующими элементами покрытия с основой. Для изолирования металлической матрицы от потока горячего газа, на ее поверхность наносили создающие термический барьер покрытия на основе ZrO_2-Y_2O_3, имеющие низкую теплопроводность.

Разработанные нами покрытия комбинированной системы состоят из компонентов Cr-Al-Co-редкоземельная группа для работы жаропрочных сплавов на никель-хромовой основе при высоких температурах. Формирование покрытий проводилось с использованием технологии ионно-плазменного напыления. Выбор ионно-плазменной технологии для создания покрытий обусловлен тем, что эта технология достаточно широко используется предприятиями при изготовлении и ремонте газотурбинных двигателей различного назначения. В качестве основного направления разработки и исследований были выбраны многослойные ионно-плазменные покрытия, обладающие наиболее высокими защитными свойствами, на рабочих лопатках турбин с равноосной и регламентированной структурой из жаропрочного сплава.

На основе анализа известных способов нами предложена технология двухслойного покрытия с внутренним металлическим и внешним керамическим слоями на подготовленной поверхности матрицы жаропрочного сплава: Cr/Al/Co (поочередное нанесение слоев) + ZrO_2-Y_2O_3. Общая толщина двухслойного теплозащитного покрытия составила 180–190 мкм. Общая толщина внутреннего слоя (Cr/Al/Co) – 60–65 мкм с содержанием Al – 30–35% масс., Cr – 40–44% масс., Co – 30–34% масс. Толщина внешнего керамического покрытия (ZrO_2-Y_2O_3) составила 120–130 мкм, концентрация оксида иттрия и оксида циркония в жаростойком слое составила соответственно 40–43% масс. и 60–63% масс.

Заключение

Таким образом, в работе приведены расчеты и разработана математическая модель процесса формирования слитка, отражающая последовательности кристаллизации и непрерывность питания объемов по высоте, температурное поле составной оболочки из литейного припаса и металлической обечайки. Приведена технологическая цепочка производства опытной отливки из сплава 20Х23Н18, включающая операции удаления прибыльной и донной частей и механическую обработку припуска по диаметру. Согласно расчетной норме на припуск, токарная обработка по диаметру слитка, до момента фактического удаления поверхностных дефектов составила 4%. Образец жаропрочной стали на никель-хромовой основе, полученный вакуумной индукционной плавкой слитка в цилиндрическую изложницу, после обработки давлением, методом холодного проката по химическому составу и требованиям к механическим свойствам, полностью соответствует марки стали 20Х23Н18 по ГОСТ 5632-72 «Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки». Получены режимы разработанного способа вакуумно-индукционной плавки жаропрочного сплава 20Х23Н18.

Предлагаемая нами схема нанесения покрытия комбинированной системы состоит из компонентов (Cr-Al-Co-редкоземельная группа) для работы изделий из жаропрочного сплава при высоких температурах. Формирование покрытий проводилось ионно-плазменным методом. Двухслойное покрытие с внутренним металлическим и внешним керамическим слоями на подготовленной поверхности матрицы жаропрочного сплава содержит: Cr/Al/Co (поочередное нанесение слоев) + ZrO_2-Y_2O_3. Общая толщина двухслойного теплозащитного покрытия составила 180–190 мкм.

Исследования проведены в рамках грантового проекта Комитета науки МОН РК «Создание композиционных покрытий для повышения эксплуатационных свойств ответственных узлов промышленного оборудования», 2020–2022 гг., номер проекта AP08053322.

Литература

1. Хапонен Н.А., Лисянский А.С. Живучесть турбин вблизи и за пределом паркового ресурса // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – №7. – С.16.
2. Гладштейн В.И. Влияние времени наработки до 350 тыс. часов на служебные характеристики и структуру литых корпусных деталей паровых турбин и арматуры // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2007. - № 2. – С.21-23.
3. Дашунин Н.В., Манилова Е.П., Быбников А.И. Фазово-структурные превращения в 12%-ной хромистой стали ЭП 428 во время длительной эксплуатации рабочих лопаток // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2007. - №1. – С.23-29.

4. Смирнов Б.М. Кластеры с плотной упаковкой // УФН. – 2002. - Т. 162, № 1. - С.119.
5. Garvin R. The commercial emergence of GE Aircraft Engines. – AIAA, 2009, p.134.
6. Langer J.S., Lemaitre A. Dinamic model of super-arrhenius relaxation in glassy materials // Phys. Rev. Lett. – 2005. – Vol. 94. – 175701.
7. Gleiter H. Nanocrystalline materials: Basic concepts and microstructure // ActaMaterialia. – 2010. – Vol. 48 (1) - P. 12-17.
8. Ino S. Stability of multiply-twinned particles // J. Phys. Soc. Japan. – 1969. – Vol.27(4). – P. 941.
9. Бульёнков Н.А., Тытик Д.Л. Модульный дизайн икосаэдрических металлических кластеров // Известия АН. – 2011. - № 1. – С.14-18.
10. Абдуллин И. Ш., Миронов М. М., Гребенщикова М. М. и др. Патент RU 2423547 C2. 10.07.2011;
11. Петров, Л.М. Многослойные ионно-плазменные покрытия в тяжелонагруженных узлах трения / Л.М. Петров, А.П. Сычев, П.Г. Иваночкин, Ю.В. Жукова // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2008. – № 8. – С. 65–68.
12. Кривобоков, В.П. Плазменные покрытия (методы и оборудование) / В.П. Кривобоков, Н.С. Сочугов, А.А. Соловьёв. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 104 с.;
13. Чуркин Б. С. Теория литейных процессов: учебник / Б. С. Чуркин, под ред. Э. Б. Гофмана. – Екатеринбург: РГППУ, 2006. – 453 с.;
14. Зборщик А. М. Специальные виды литья: конспект лекций / А. М. Зборщик. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2007. – 158 с.

КОМПОЗИЦИЯЛЫҚ ЖАБЫНДЫМЕН Ni-Cr НЕГІЗІНДЕ ЖЫЛУҒА ТӨЗІМДІ ҚОРЫТПАНЫ АЛУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ШЫҒАРУ ЖӘНЕ ЗЕРТТЕУ

[1] М.К. Скаков, [2] Ас.М. Жилкашинова, [3] А.В. Градобоев, [2] Ал.М. Жилкашинова, [2] М.Б. Абилев

[1] Ұлттық ядролық орталық, Курчатов, Қазақстан
[2] Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен, Қазақстан
[3] Ұлттық зерттеу Томск политехникалық университеті, Томск, Ресей

Мақалада никель негізіндегі жылуға төзімді қорытпаның үлгілерін жасау және композициялық жабындыны қолдану әдісі сипатталады. Берілген құрылымды Ni-Cr негізінде (20Х23Н18) жоғары температуралы қорытпалар алынды. Тәжірибелік құймаларды дайындау келесі операцияларды қамтиды: дайын қорытпаның өлшенген шихта дайындамасын қыздыру; 1600 °С температураға дейін қыздыру және металды вакуумда 10^{-2}–10^{-4} Па балқыту; үлгіні металдың температурасы 1480–1530 °С температурада қалыпқа құю, қалып температурасы 950–1000 °С. Кристалдану дәйектілігі мен көлемінің биіктік бойынша үздіксіздігін, құрылымдық қабығының температуралық өрісін көрсететін құйма түзілу процесінің есептеулері мен математикалық моделі орындалды. Шығарылған математикалық модель құймаларды жасау кезінде балқыманы воронкаға тұрақты деңгейде құю керек екенін көрсетті: ыстыққа төзімді 20Х23Н18 қорытпа матрицасының дайындалған бетінде ішкі металл және сыртқы керамикалық қабаттары бар Cr/Al/Co + ZrO_2-Y_2O_3 екі қабатты жабудың ионды-плазмалық технологиясы ұсынылған.

DEVELOPMENT AND STUDY OF TECHNOLOGY FOR OBTAINING A HEAT-RESISTANT Ni-Cr ALLOY WITH A COMPOSITE COATING

[1] M.K. Skakov, [2] As.M. Zhilkashinova, [3] A.V. Gradoboyev, [2] Al.M. Zhilkashinova, [2] M.B. Abilev

[1] National Nuclear Center, Kurchatov, Kazakhstan
[2] Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
[3] National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

The article describes a method for obtaining samples of a heat-resistant nickel-based alloy, followed by applying a composite coating. Model high-temperature alloys based on Ni-Cr (20Kh23N18) with a given structure have been obtained. Manufacturing of experimental castings included the following operations: heating of the measured charge billet of the finished alloy; heating to a temperature of 1600 °C and melting the metal in a vacuum of 10^{-2}–10^{-4} Pa; pouring the sample into a mold at a metal temperature of 1480–1530 °C, the mold temperature was 950–1000 °C. Mathematical model of the ingot formation process was calculated, reflecting the crystallization sequence and the continuity of the volume supply along the height, the temperature field of the composite shell, have been performed. The developed mathematical model showed that during the production of ingots, the melt should be poured at a constant level in the funnel. To apply a two-layer coating with inner metal and outer ceramic layers on the prepared surface of the matrix of the heat-resistant 20Kh23N18 alloy: Cr/Al/Co + ZrO_2-Y_2O_3, an ion-plasma technology was proposed.