

УДК 669.245.018: 620. 193.53

Канд. техн. наук А. Г. Андриенко, канд. техн. наук С. В. Гайдук,
канд. техн. наук В. В. Кононов

Национальный технический университет, г. Запорожье

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГТУ С НАПРАВЛЕННОЙ (МОНО) СТРУКТУРОЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО КОРРОЗИОННОСТОЙКОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА

Разработан литейный жаропрочный коррозионностойкий сплав на никелевой основе для направленной кристаллизации и монокристаллического литья, близкий по уровню механических свойств авиационным сплавам ЖС6К-ВИ и ЖС6У-ВИ с равноосной структурой и ЖС26-ВИ с направленной структурой. Отработан технологический процесс получения лопаток ТВД с направленной структурой двигателя Д-336.

Ключевые слова: жаропрочные никелевые сплавы, направленная (моно) кристаллизация, жаропрочность, структурная стабильность, технологичность, рабочая лопатка, газовая турбина.

Введение

В последнее время, в связи с проблемой конверсии авиационные конструкторские бюро и моторные заводы широко занимаются разработкой и производством стационарных энергетических и газоперекачивающих газотурбинных установок (ГТУ). В новых ГТУ, как и в авиационных ГТД, все шире находят применение турбинные лопатки с направленной и монокристаллической структурой. При этом, данные предприятия стремятся использовать ранее разработанные технологии и накопленный опыт по применению в качестве материала рабочих лопаток авиационные жаропрочные сплавы ЖС6К-ВИ, ЖС6У-ВИ, ЖС26-ВИ, ЖС32-ВИ [1]. Как показал опыт эксплуатации, данный класс материалов надежно работает в условиях высококачественных топлив при температурах 1000–1100 °С. В сульфидно-оксидной среде, возникающей при сгорании топлива в стационарных газовых турбинах, сплавы данного класса склонны к интенсивному коррозионному повреждению, для предотвращения которого применяются защитные покрытия. Известно, что необходимым условием высокой эксплуатационной надежности деталей ГТД является коррозионная стабильность внешней поверхности сплавов. Хотя на лопатки наносят различные за-

щитные покрытия, однако сопротивление газовой и солевой коррозии сплава-основы имеет большое значение, так как процессом, контролирующим ресурс работы деталей горячей части ГТД, при постоянных температурно-силовых параметрах, является высокотемпературная коррозионная стойкость (ВТК), приводящая к ускоренному повреждению рабочих лопаток и преждевременному выходу из строя лопаточного аппарата [2–4].

В ряде известных исследований [5–9] отмечается, что применение метода направленной кристаллизации (НК) к коррозионностойким сплавам, предназначенным для литья лопаток с равноосной структурой (IN-939, IN-738LC – за рубежом; ЧС-70, ЧС-88, ЗМИ-3У – в России), не вызывает заметного повышения их характеристик жаропрочности. Кроме этого, для данного класса сплавов не удается обеспечить достаточно высокого уровня выхода годного литья по макроструктуре.

Постановка задачи

Цель настоящей работы – разработка литейного коррозионностойкого никелевого сплава для направленной (моно) кристаллизации с жаропрочностью, эквивалентной некоррозионностойкому авиационному

сплаву ЖС26-ВИ и обработка технологического процесса литья из него рабочих лопаток турбин высокого давления (ТВД) с направленной структурой с применением серийной технологии производства лопаток из сплава ЖС26-ВИ, которая обеспечит выход годного литья по макроструктуре не менее 50 %.

Монокристаллические (МК) образцы сплавов ЖС26-ВИ, ЗМИ-ЗУ и ЗМИ-ЗУМ1 были отлиты со скоростью кристаллизации $\bar{V}_{кр} = 10$ мм/мин в виде стандартных цилиндрических заготовок диаметром 16 и длиной 180 мм. Рост монокристалла в образцах осуществлялся за счет специальной затравки, изготовленной из бинарного сплава системы Ni-W, которая предварительно устанавливалась в керамическую форму.

Монокристаллические образцы с кристаллографической ориентацией (КГО) [001] прошли 100 % контроль макроструктуры путем травления в растворе, содержащем хлорное железо (700–800 г), соляную кислоту (120–150 см³) и воду до 1 дм³, а также контроль КГО на установке ДРОН-3М. В таблице 1 приведены химические составы плавок исследованных сплавов, которые контролировались общепринятыми методами – химическим и спектральным.

Обработка температурно-скоростных параметров процесса литья опытных лопаток проводилась на высокоградиентной установке для направленной кристаллизации УВНК-8П. Для лопаток с НК- и МК-структурой осуществлялся контроль аксиальной ориентации соответственно требованиям, предъявляемым к макроструктуре отливок лопаток, которые состоят в следующем: отливка лопатки должна иметь направленную или монокристаллическую структуру КГО [001] и отклонением от основного направления на соответствие условиям: $0^\circ \leq \alpha_{001} \leq 20^\circ$.

Таблица 1 – Химический состав плавок исследованных сплавов

Марка сплава	Содержание элементов, % (масс.)										
	C	Cr	Co	Mo	W	Ti	Al	Nb	Ta	V	Ni
ЖС26-ВИ	0,15	4,9	9,1	1,1	11,2	0,9	5,8	1,6	–	0,9	Осн.
ЗМИ-ЗУ	0,12	13,3	5,6	0,9	7,1	5,1	3,0	–	–	–	Осн.
ЗМИ-ЗУМ1	0,06	11,2	5,1	0,8	7,3	4,3	3,9	–	4,1	–	Осн.

Таблица 2 – Результаты испытаний на кратковременную прочность

№ образца	Предел прочности, σ_0 , МПа	Отн. удлинение, δ , %
1	1009	15,6
2	1244	6,0
Для сплава ЖС26-В	≥ 850	≥ 6

Таблица 3 – Результаты испытаний на длительную прочность

Длительные жаропрочные испытания: $\sigma_{40}^{975} = 260$ МПа, не менее – для ЖС26-ВИ					
№ образца	Напряжение, σ , МПа	Температура испытания, $^\circ\text{C}$	Задано часов	Выдержал часов	Примечание
1	26	975	40	50.05	разрушился
2	26	975	40	41.00	разрушился

Литые заготовки опытных образцов и лопаток подвергались двухступенчатой термической обработке в вакууме или нейтральной атмосфере в соответствии с паспортным режимом для сплавов ЖС26-ВИ и ЗМИ-ЗУ. Для модификации сплава ЗМИ-ЗУМ1 температура гомогенизации (I-я ступень ТО) назначалась на основании анализа данных, предварительно полученных методом дифференциального термического анализа (ДТА). Она составила $1240^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$.

Вторая ступень термической обработки – высокотемпературное старение – проводилась при температуре $1050^\circ \pm 5^\circ\text{C}$.

Механические испытания образцов на кратковременную прочность проводились на стандартных цилиндрических образцах с рабочей частью диаметром 5 и длиной 25 мм по ГОСТ 9651-73 при температурах 20, 800, 900, 1000 $^\circ\text{C}$ на разрывной машине марки УМЭ-10ТМ. Испытания на длительную прочность проводились по ГОСТ 10145-81 на разрывных машинах марки АИМА-5-2 при температурах и напряжениях, соответственно требованиям для входного контроля на сплав ЖС26-ВИ.

Анализ результатов

В настоящей работе представлены сравнительные результаты механических и технологических свойств сплава ЗМИ-ЗУМ1 [10], разработанного на основе коррозионностойкого сплава ЗМИ-ЗУ, в сравнении со сплавом ЖС26-ВИ, с направленной и монокристаллической структурой. В таблицах 2 и 3 приведены результаты входного контроля свойств МК-образцов сплава ЗМИ-ЗУМ1 в сравнении с паспортными требованиями на сплава ЖС26-ВИ. Образцы имели следующие отклонения КГО от основного направления: образец 1 – $\Delta\alpha_{001} = 5^\circ$, образец 2 – $\Delta\alpha_{001} = 3^\circ$.

Результати входного контролю показали, що свойства разработанного сплава ЗМИ-ЗУМ1 соответствуют паспортным требованиям на сплав ЖС-26-ВИ, при этом у сплава ЗМИ-ЗУМ1 заметно выше кратковременное сопротивление разрыву.

На рисунке 1 представлены сравнительные результаты испытаний на кратковременную прочность МК-образцов с КГО [001] из сплавов, полученных при скорости кристаллизации $\bar{v}_{кр} = 10$ мм/мин после термической обработки.

Сравнительный анализ этих данных показал, что при температуре испытания 20 °С предел прочности и предел текучести сплавов ЗМИ-ЗУ и ЗМИ-ЗУМ1 выше, а пластичность ниже, чем у сплава ЖС-26ВНК (рис. 1, а). При температурах испытания 800 и 900 °С предел прочности и предел текучести у сплава ЖС-26ВНК выше, чем у сплава ЗМИ-ЗУ, однако ниже, чем у сплава ЗМИ-ЗУМ1 при эквивалентной пластичности (рис. 1 б, в).

При температуре испытания 1000 °С предел прочности у сплава ЗМИ-ЗУ существенно ниже, а пластичность несколько выше, чем у сплавов ЗМИ-ЗУМ1 и ЖС-26ВНК. Предел прочности сплавов ЗМИ-ЗУМ1 и ЖС-26ВИ НК практически одинаковый, а предел текучести у сплава ЗМИ-ЗУМ1 выше при одинаковой пластичности (рис. 1, г).

На рис. 2 представлены сравнительные кривые 100 и 1000-часовой длительной прочности МК образцов с КГО [001] сплавов, полученных при скорости кристаллизации 10 мм/мин после ТО. Сравнительный анализ результатов показал, что в интервале температур 800–1000 °С сплав ЗМИ-ЗУМ1 существенно превосходит базовый сплав ЗМИ-ЗУ и имеет эквивалентную жаропрочность по сравнению со сплавом ЖС-26ВНК.

Анализ результатов испытаний показал, что оптимизация концентрации хрома и тантала в промышленном сплаве ЗМИ-ЗУ обеспечили повышение жаропрочности до необходимого уровня без снижения параметров ВТК-стойкости [10].

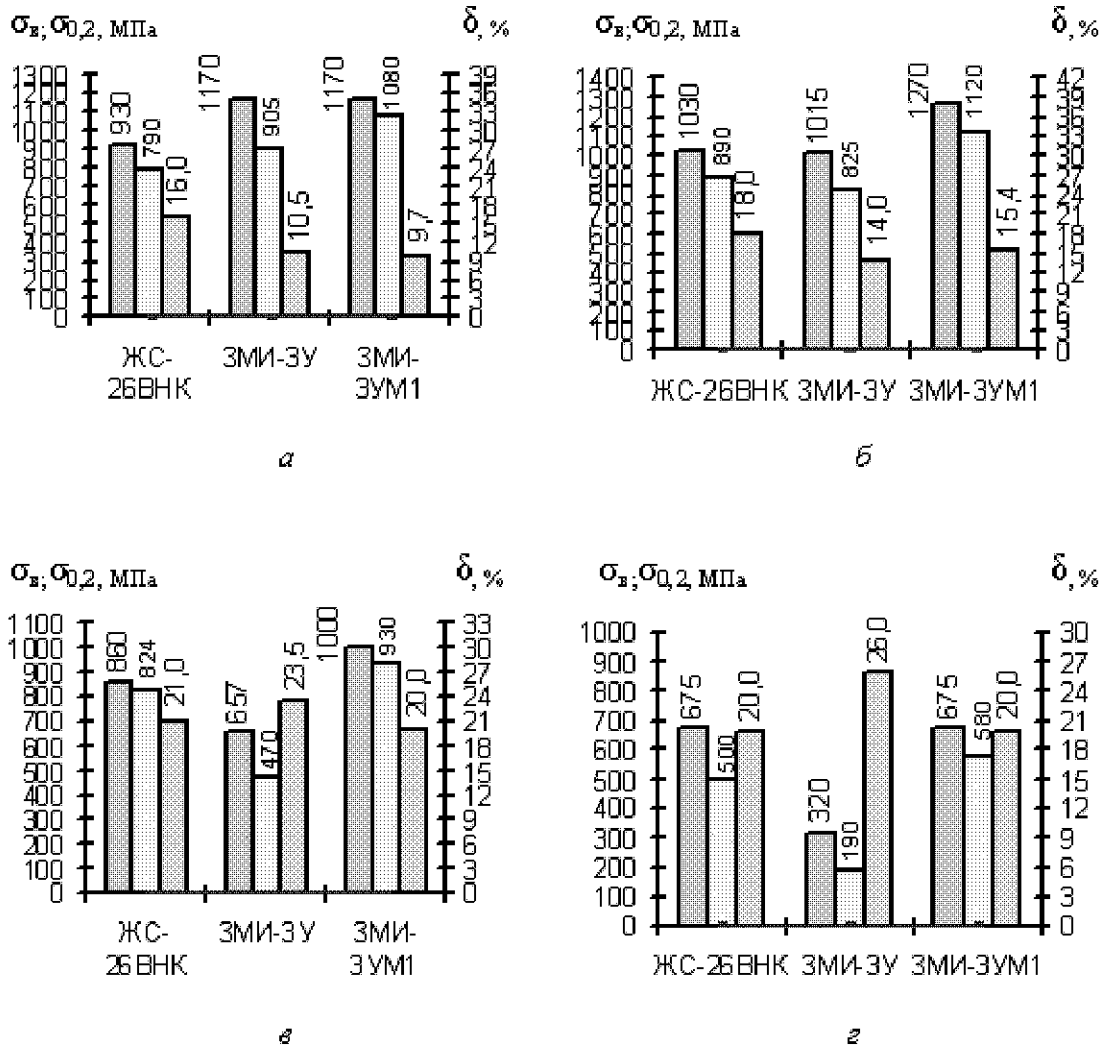


Рис. 1. Механические свойства МК- образцов с КГО [001], полученные при скорости кристаллизации $\bar{v}_{кр} = 10$ мм/мин, после термической обработки и испытаний при различных температурах: а – 20 °С; б – 800 °С; в – 900 °С; г – 1000 °С

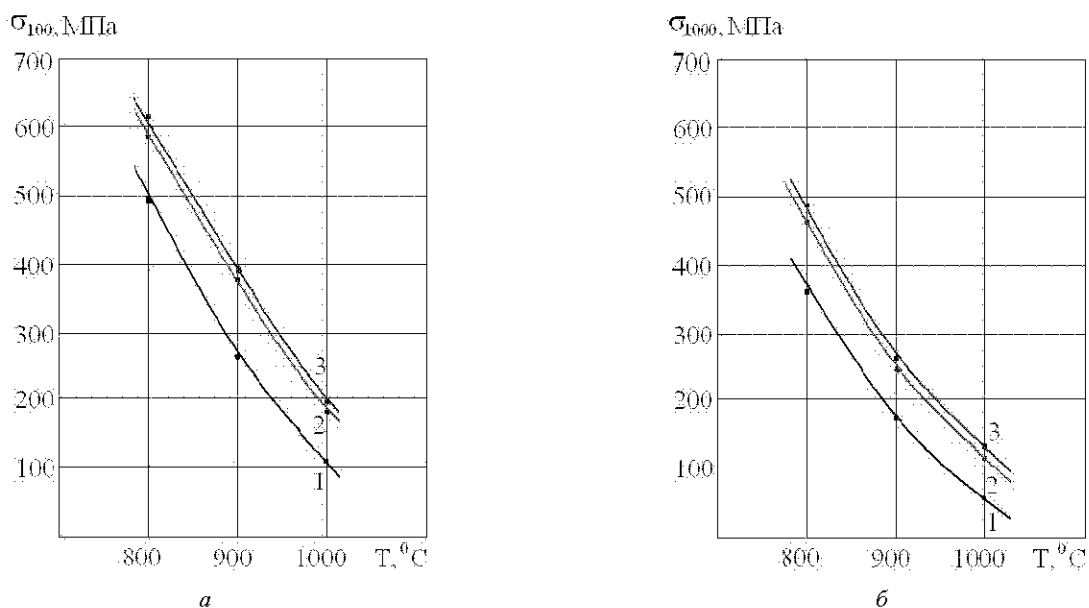


Рис. 2. Кривые 100-ч и 1000-ч длительной прочности МК-образцов, отлитых при скорости кристаллизации $\bar{V}_{кр} = 10 \text{ мм/мин}$, после термической обработки: 1 – ЗМИ-ЗУ; 2 – ЗМИ-ЗУМ1; 3 – ЖС-26ВНК

Сплав ЗМИ-ЗУМ1 по сравнению с составом сплава ЖС26-ВИ содержит тантал и не содержит ниобия и ванадия, при этом имеет более высокую концентрацию хрома, титана и более низкую концентрацию алюминия, вольфрама, кобальта и зернограницных упрочнителей – углерода и бора. Наличие в сплаве ЗМИ-ЗУМ1 оптимальной концентрации тантала устранило струйную ликвацию на опытных лопатках по сравнению со сплавом ЗМИ-ЗУ.

После длительного теплового воздействия при температурах 850 °C и 950 °C на базе 5000 часов разработанный сплав ЗМИ-ЗУМ1 обладает высокой фазовой стабильностью, при этом выделений ТПУ-фаз пластинчатой морфологии, приводящих к разупрочнению и потере пластичности сплава, не выявлено.

Проведенные ранее исследования процессов формирования структуры в лопатках с направленной и монокристаллической структурой энергетического агрегата MS5001, полученных из жаропрочного коррозионностойкого сплава ЗМИ-ЗУМ1 показал, что технологические параметры сплава зависят от интервала кристаллизации и содержания в сплаве вредных элементов.

Как показала практика, выплавка исходного состава сплава в вакуумно-индукционной печи УППФ-3М из чистых шихтовых материалов по специальным режимам, а также из возвратного металла с применением высокотемпературной обработки расплава (ВТОР) в среде аргона, обеспечило снижение содержания в сплаве кислорода и азота с 30–40 ppm до 8–12 ppm. При этом, заметно повысилась технологичность сплава при формировании бездефектной направленной и монокристаллической структуры за счет снижения вероятности зарождения посторонних кристаллов на перелопаток.

Технологическое апробирование сплава ЗМИ-ЗУМ1 в промышленных условиях проводилось совместно кафедрой «Физического материаловедения» ЗНТУ и ЗМКБ «Прогресс» при литье рабочих лопаток первой ступени двигателя Д-336 на установке для направленной кристаллизации УВНК-8П. Сплав ЗМИ-ЗУМ1 показал высокую технологичность при литье методом направленной кристаллизации, что было подтверждено получением опытной партии отливок рабочих лопаток первой ступени двигателя Д-336.

В процессе оптимизации скорости кристаллизации $\bar{V}_{кр}$ было установлено, что для сплавов ЗМИ-ЗУМ1 и ЖС26-ВИ оптимальной скоростью направленной кристаллизации является скорость 7 мм/мин, которая обеспечивает максимальный уровень выхода годного литья по макроструктуре (рис. 3).

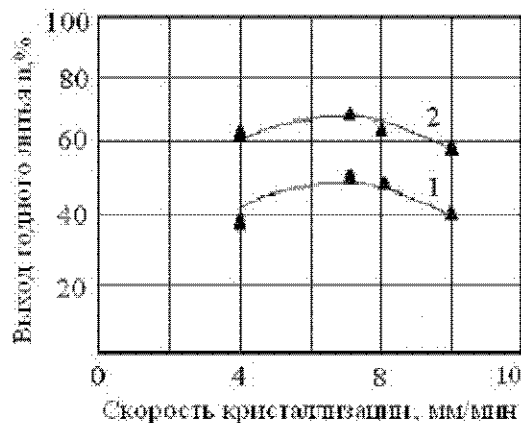


Рис. 3. Влияние скорости кристаллизации на уровень выхода годного литья рабочих лопаток ТВД с направленной (моно) структурой двигателя Д-336: 1 – ЖС-26ВНК; 2 – ЗМИ-ЗУМ1

Результаты сравнительного технологического апробирования показали, что максимальный уровень выхода годного литья по макроструктуре составляет: для сплава ЖС-26ВНК (кривая 1) $n = 45-50 \%$, для сплава ЗМИ-ЗУМ1 (кривая 2) $n = 65-70 \%$, что \sim в 1,5 раза выше.

При уменьшении или увеличении параметра $\bar{V}_{кр}$ наблюдается заметное снижение уровня выхода годного литья по макроструктуре. Таким образом, разработанный сплав ЗМИ-ЗУМ1 показал более высокую технологичность по сравнению со сплавом ЖС26-ВИ.

В процессе технологической обработки было установлено, что макроструктурный дефект – пересечение границами кристаллов входной кромки ближе к радиусу перехода бандажной полки к перу обусловлено конструкцией стартового конуса «коробчатый» тип (рис. 4), где зарождение посторонних кристаллов происходит на гребешке бандажной полки не от стартового конуса. Зарождение столбчатых зёрен с пера лопатки хотя и не является браковочным признаком для лопаток с направленной структурой, однако, эти кристаллы имеют большие углы отклонения от КГО [001], так как их рост начался не от стартового кристалла.

В процессе обработки технологии установлено, что для повышения уровня выхода годных отливок по макроструктуре необходимо изменить конструкцию стартового конуса с «коробчатого» типа (рис. 4, а) на стартовый конус типа «домик» (рис. 4, б).

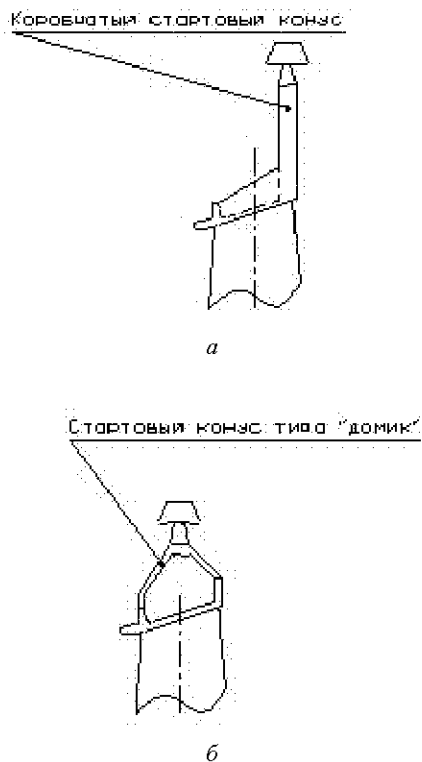


Рис. 4. Типы стартовых конусов лопатки ТВД:
а – коробчатый; б – домик

При заливке опытных лопаток на установке УВНК-8П по отработанным технологическим параметрам методы люминисцентного контроля и цветной дефектоскопии не выявили трещин при кристаллизации (рис. 5).

На поверхности отливок из сплава ЗМИ-ЗУМ1 после выбивки керамической оболочки отсутствовали следы взаимодействия материала оболочки и материала лопаток (пригар), которые наблюдались на лопатках из сплава ЖС26-ВИ. Причиной отсутствия пригара явилось присутствие тантала в составе ЗМИ-ЗУМ1 и более низкое содержание углерода (0,04–0,06) % по сравнению со сплавом ЖС26-ВИ (0,12–0,18) %. На поверхности отливок лопаток имелось местное проявление макроструктуры. Травление отливок на макроструктуру выполнялось по технологии, применяемой для сплава ЖС26-ВИ. После травления лопаток из сплава ЗМИ-ЗУМ1 макроструктура проявилась после первого травления, а для отливок из сплава ЖС26-ВИ перед травлением на макроструктуру необходимо выполнять зачистку пера лопаток от пригара, а также проводить повторное травление при плохом проявлении макроструктуры, что значительно увеличивает трудоемкость и затраты.

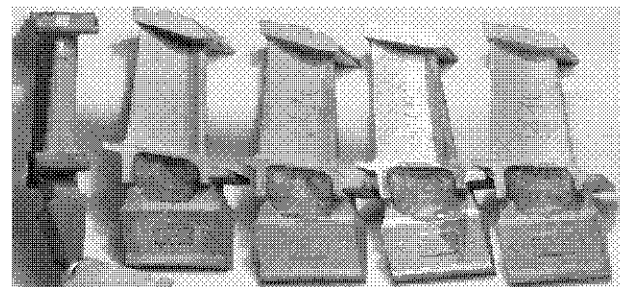


Рис. 5. Рабочие лопатки ТВД с направленной и монокристаллической структурой установки Д-336

Контроль геометрии лопаток, изготовленных из сплава ЗМИ-ЗУМ1, не выявил каких-либо отклонений, нехарактерных для отливок лопаток, полученных из сплава ЖС26-ВИ. Обмер габаритных размеров лопаток, отлитых из сплавов ЗМИ-ЗУМ1 и ЖС26-ВИ, показал, что сплавы имеют примерно одинаковую усадку. После механической обработки 24 опытные лопатки, изготовленные из сплава ЗМИ-ЗУМ1, подвергли усталостным испытаниям на вибростенде МИКАТ с параметрами нагружения: $\sigma_{нач} = 180$ МПа; $\Delta\sigma = \pm 2$ МПа; $N = 2 \cdot 10^7$ циклов, с целью определения предела выносливости. После испытаний результаты цветной ЛЮМ1-ОВ дефектоскопии показали, что по перу лопаток трещин нет. Предел выносливости лопаток из сплава ЗМИ-ЗУМ1 составляет $\sigma_{-1} = 240$ МПа, что соответствует паспортным требованиям для входного контроля на сплав ЖС26-ВИ – $\sigma_{-1} \geq 180$ МПа.

Выводы

1. На базе сплава ЗМИ-ЗУ разработан литейный коррозионностойкий сплав ЗМИ-ЗУМ1 с повышенной жа-

ропрочностью для литья рабочих лопаток с направленной и монокристаллической структурой. По комплексу механических свойств в интервале температур 800–1000 °С сплав ЗМИ-ЗУМ1 превосходит существующие коррозионностойкие отечественные и зарубежные аналоги и не уступает в жаропрочности авиационному сплаву ЖС26-ВИ с направленной структурой, заметно превосходя его по сопротивлению газовой и солевой коррозии.

2. Отработан технологический процесс литья рабочих лопаток ТВД с направленной (моно) структурой двигателя Д-336 из разработанного сплава ЗМИ-ЗУМ1 с использованием серийной технологии получения аналогичных лопаток из сплава ЖС26-ВИ. Уровень выхода годного литья лопаток из сплава ЗМИ-ЗУМ1 по макроструктуре составил 65–70 %, что ~ в 1,5 раза выше, чем у сплава ЖС26-ВИ.

3. Для обеспечения стабильности получения бездефектной структуры и повышения уровня выхода годных отливок по макроструктуре необходимо изменить конструкцию стартового конуса с «коробчатого» типа на стартовый конус типа «домик».

4. Результаты усталостных испытаний показали, что предел выносливости лопаток из сплава ЗМИ-ЗУМ1 составляет величину $\sigma_{-1} = 240$ МПа, что на 60 МПа выше требований для входного контроля на сплав ЖС26-ВИ ($\sigma_{-1} \geq 180$ МПа).

Список литературы

1. Шалин Р. Е. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов / [Р. Е. Шалин, И. Л. Светлов, Е. Б. Качанов и др.]. – М. : Машиностроение, 1997. – 336 с.
2. Толорая В. Н. Коррозионностойкие жаропрочные сплавы для крупногабаритных монокристаллических турбинных лопаток / В. Н. Толорая, Н. Г. Орехов, Б. С. Ломберг // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2003. – № 1. – С. 30–32.
3. Никитин В. И. Коррозия и защита лопаток газовых турбин / В. И. Никитин – Л. : Машиностроение, 1987. – 272 с.
4. Патон Б. Е. Жаропрочность литейных никелевых сплавов и защита их от окисления / [Б. Е. Патон, Г. Б. Строганов, С. Т. Кишкин и др.]. – К. : Наук. думка, 1987. – 256 с.
5. Яцька С. И. Производство высокотемпературных литейных лопаток авиационных ГТД / С. И. Яцька. – М. : Машиностроение, 1995. – 255 с.
6. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия) / Е. Н. Каблов. – М. : МИСИС, 2001. – 632 с.
7. Каблов Е. Н. Жаропрочность никелевых сплавов / Е. Н. Каблов, Е. Р. Голубовский. – М. : Машиностроение, 1998. – 464 с.
8. Котсорадис Д. Жаропрочные сплавы для газовых турбин. Материалы международной конференции / [Д. Котсорадис, П. Феликс, Х. Фишмайстер и др.]; пер. с англ. под ред. Р. Е. Шалина. – М. : Металлургия, 1981. – 480 с.
9. Симс Ч.Т. Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / Ч. Т. Симс, Н. С. Столофф, У. К. Хагель ; пер. с англ. в 2-х кн. под ред. Р.Е Шалина. – М. : Металлургия, 1995. – 384 с.
10. Пат. 77606, Україна, МПК⁶ С22С 19/05. Ливарний жароміцний корозійностійкий нікелевий сплав / [А. Г. Андриєнко, С. В. Гайдук, В. В. Кононов, В. С. Замковий та ін.]. ; заявл. 04.08.05, № а 200507748 ; опубл. 15.12.06, Бюл. № 12. – 16 с.

Одержано 22.11.2012

Андриєнко А.Г., Гайдук С.В., Кононов В.В. Механічні властивості і технологічні особливості отримання деталей гту зі спрямованою (моно) структурою з жароміцного корозійностійкого нікелевого сплаву

Разроблено ливарний жароміцний корозійностійкий сплав на нікелевій основі для спрямованої кристалізації і монокристалевого литва, близький за рівнем механічних властивостей до авіаційних сплавів ЖС6К-ВІ і ЖС6У-ВІ із рівновісною структурою та ЖС26-ВІ зі спрямованою структурою. Відпрацьовано технологічний процес отримання лопаток ТВД зі спрямованою структурою до двигуна Д-336.

Ключові слова: жароміцні нікелеві сплави, спрямована (моно) кристалізація, жароміцність, структурна стабільність, технологічність, робоча лопатка, газова турбіна.

Andrienko A., Gayduk S., Kononov V. Mechanical properties and technological procedure features in manufacture of gas turbine parts with directed (mono) crystallization made of corrosion-resistant nickel-base superalloy

High - temperature corrosion - resistant nickel-base casting superalloy for directed solidification and monocrystalline casting with mechanical properties near values of aircraft alloys ЖС6К-ВІ and ЖС6У-ВІ with equiaxed structure and ЖС26-ВІ with directed structure was developed. Manufacture procedures of engine Д-336 high-temperature turbine-blades with the directed structure have been tried-out.

Key words: nickel base superalloys, directed (mono) crystallization, high-temperature strength, structural stability, castability, blade, gas turbine.