

УДК 669.018.44:669.017.165:669.245

В.В. Кучеряев¹, Н.А. Миронова¹, С.Ю. Шишков¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СЛИТКОВ ИЗ СПЛАВА СИСТЕМЫ Ni–Al–Co

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-1-1

Представлены результаты исследований микроструктуры и реологических свойств с целью разработки технологии получения дисков турбин из сплавов системы Ni–Al–Co. Рассмотрены особенности применения защитных технологических покрытий (ЗТП) на основе стеклокерамики при изотермической штамповке слитка экспериментальной композиции тройной системы Ni–Al–Co. Показана эффективность применения ЗТП при деформации.

Ключевые слова: интерметаллидный жаропрочный сплав, система Ni–Al–Co, реология, механические свойства, газотурбинные двигатели, технологическое покрытие.

The results of studies of the structure and rheological properties of the experimental alloy based on ternary Ni–Al–Co system for development gas turbine disk technology are presented. Application specifics of protective coatings technology (PCT) based on vitreous during isothermal forging of the experimental alloy ingots based on ternary Ni–Al–Co on the air are considered. The effectiveness of PCT in the deformation process is experimentally demonstrated.

Keywords: intermetallic alloy, ternary Ni–Al–Co system, rheology, mechanical properties, gas turbine engine, protective coating technology.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

Анализ тенденций развития зарубежных газотурбинных двигателей (ГТД) для авиационной техники показывает, что при разработке ГТД нового поколения приоритетными направлениями на ближайшие 10–15 лет (программы VAATE, UEET, Leap-X) являются: улучшение топливной экономичности, увеличение тяги, снижение массы, уменьшение шума и вредных выбросов (NO_x, CO₂) в атмосферу. В России для создания конкурентоспособной авиационной техники приняты государственные и отраслевые программы, в которых поставлены аналогичные цели и задачи на перспективу до 2030 года [1, 2].

С точки зрения материаловедения поставленные задачи можно решать путем разработки новых более эффективных материалов и технологий их производства. Для деталей горячего тракта, в том числе дисков турбины, в соответствии с намеченными целями наиболее важным является увеличение их рабочей температуры и снижение плотности при прочностных свойствах либо на уровне, либо выше уровня этих свойств у существующих материалов.

В области жаропрочных сплавов для дисков за последнее десятилетие разработаны новые материалы: LHSR, Rene 104, RR 1000, Alloy 10 (зарубежные сплавы); ВЖ175-ИД, ВВ750П и ВВ751П (отечественные сплавы).

Состав, структура и технология производства таких сплавов постоянно совершенствуются. Например, в сплаве ВЖ175-ИД (разработчик ВИАМ) помимо тщательно сбалансированного состава применены новые подходы к формированию структуры

заготовки диска. Благодаря этому материал обладает преимуществом по ряду характеристик (МЦУ, предел прочности и длительной прочности) в сравнении с аналогами [3, 4].

Однако несмотря на значительные успехи в улучшении комплекса прочностных характеристик рабочие температуры новых жаропрочных никелевых сплавов для дисков не превышают 800°C, за исключением сплава ЭП975-ИД, разработанного для длительной эксплуатации при температурах до 850°C.

Существенное увеличение (на 100°C и более) рабочих температур жаропрочных никелевых сплавов возможно путем добавок рения и рутения, стабилизирующих γ -твердый раствор, которые используются в литейных сплавах нового поколения [5, 6]. Подобное дорогостоящее легирование сплавов, используемых для изготовления дисков ГТД, не применимо. В связи с вышесказанным разработка принципиально новых материалов и технологий получения дисков ГТД становится все более актуальной.

Поиск альтернативы жаропрочным никелевым сплавам ведется много лет. Известны исследования, направленные на разработку материалов, дисперсионно-упрочняемых более термически стабильными частицами, чем γ' -фаза $Ni_3(Al, Ti)$. Так, предлагаются сплавы на основе кобальта, упрочняемые $Co_3(Al, W)$ [7, 8]; высокотемпературный сплав на основе тройной эвтектики с высоким содержанием ниобия [9]; сплавы на основе иридия, упрочняемые $Ir_3(Al, W)$, $Ir(Al, W)$ [10]. Однако такие материалы либо имеют высокую плотность, либо чрезвычайной дороги. Наиболее изученными высокотемпературными материалами являются интерметаллидные сплавы на основе Ni_3Al .

В ВИАМ разработан ряд сплавов серии ВКНА для лопаток с рабочими температурами 900–1200°C и низкой плотностью [11, 12]. Однако такие материалы не являются деформируемыми и в качестве сплавов для дисков не применяются.

Одной из перспективных для получения дисков ГТД является система $Ni-Al-Co$, обладающая низкой плотностью (менее 8 г/см³) и рабочей температурой >900°C. В работе [13] приведен ряд свойств деформированных полуфабрикатов из сплавов системы $Ni-Al-Co$, улучшение которых возможно лишь благодаря разработке оптимальных режимов деформации.

Целью данной работы является изучение технологических особенностей деформирования слитков из сплава системы $Ni-Al-Co$.

Материалы и методы

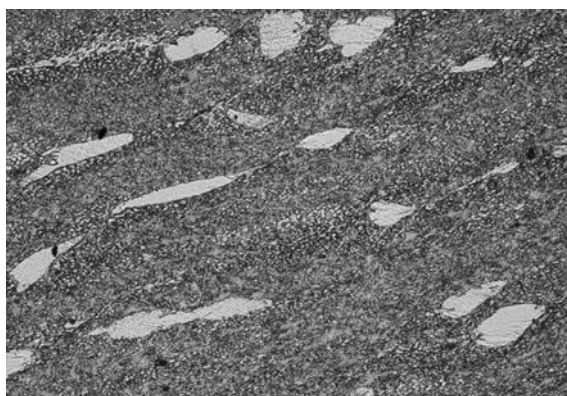
Выплавлены два слитка из сплава системы $Ni-Al-Co$ в печи ИСВ-016 с расчетным составом (содержание элементов, % по массе): 56,8 – Ni; 33,6 – Co; 7,5 – Al; 2,1 – Ti, с переплавом на установке направленной кристаллизации УВНК-14 и гомогенизирующим отжигом. Испытания для определения технологической пластичности при растяжении при повышенных температурах проводили на испытательной машине 1958-У10-1 в соответствии с ГОСТ 9651–84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах» в интервале температур от 1100 до 1200°C (с шагом в 20°C). Осадку литых образцов для определения допустимой степени деформации при сжатии проводили на прессе с усилием 25 тс в интервале температур от 1100 до 1140°C (с шагом 20°C), в интервале температур от 1150 до 1200°C (с шагом 10°C). Исследование микроструктуры проводили на микроскопе Zeiss Vert.A1. Оценку защитных свойств технологического покрытия проводили термогравиметрическим методом по ГОСТ 6130–71 «Металлы. Методы определения жаростойкости».

Результаты

Установлено, что при легировании сплава системы $Ni-Al-Co$ алюминием >9% (по массе) структура металла в литом состоянии представляет собой γ -матрицу с

дисперсными частицами γ' -фазы и крупными включениями β -фазы неправильной формы, вокруг и внутри которых присутствуют γ' -частицы. Состав β -фазы неравновесный, и при высокотемпературной обработке происходит выделение γ' -частиц внутри β -зерен, при этом исходные фазовые границы (β - γ') не изменяются [13]. В процессе исследований установлено отрицательное влияние β -фазы на деформационную способность композиций. По цилиндрической поверхности слитков в зонах наибольших растягивающих напряжений на разных стадиях деформации образовывались многочисленные трещины. По результатам исследований микроструктуры таких дефектных областей выявлено, что растрескивание в основном происходит по границе раздела фаз (β/γ'). Для проведения дальнейших исследований химический состав подобран таким образом, чтобы в структуре отсутствовала β -фаза.

В процессе работы были опробованы режимы деформации образцов в гомогенизированном состоянии со степенями деформации от 30 до 80% в интервале температур от 1100 до 1200°C. В интервале температур от 1100 до 1140°C пластичность образцов не превышает 30%, от 1160 до 1200°C – наблюдается ее рост до 70%. Анализ результатов испытаний показал, что сплав системы Ni–Al–Co вышеуказанного состава обладает наибольшей пластичностью при сжатии, которая составляет 76%, данный результат получен при температуре 1180°C. Анализ микроструктуры данного образца (рис. 1) показал, что во всем объеме образца присутствуют крупные частицы эвтектической γ' -фазы, размер которых составляет от 30 до 100 мкм.



100 мкм

Рис. 1. Микроструктура образца из сплава Ni–Al–Co, деформированного при температуре 1180°C

Проведено исследование микроструктуры образцов после осадки в интервале температур от 1100 до 1200°C. Анализ микроструктуры образцов после деформации показал, что рекристаллизация (γ/γ')-твердого раствора проходит только при температурах 1160°C и выше. В процессе деформации в образцах образуются зоны интенсивного течения и застойные зоны на торцах образцов. Такая структура характерна для деформации методом прямой осадки. Для устранения данного явления, которое может привести к анизотропии свойств, перед деформацией заготовки помещают в теплоизоляционный пакет из стеклоткани и каолиновой ваты, который наносится на образующую поверхность заготовки, на торцы заготовок помещают пластины из нержавеющей стали толщиной от 2 до 8 мм.

С целью изучения влияния температуры и продолжительности выдержки образцов из жаропрочного интерметаллидного сплава системы Ni–Al–Co на микроструктуру проведен отжиг деформированных заготовок в интервале температур от 1160 до 1200°C

с выдержками 0,5, 1 и 2 ч. По результатам исследования микроструктуры отожженных образцов установлено, что формирование зеренной структуры в частицах эвтектической γ' -фазы проходит с одинаковой интенсивностью во всем интервале температур (1160, 1180 и 1200°C), а продолжительность выдержки не влияет на размер данных частиц (рис. 2). Образование границ зерен частиц протекает в первые полчаса выдержки, при более длительной выдержке частицы эвтектической γ' -фазы изменений не претерпевают.

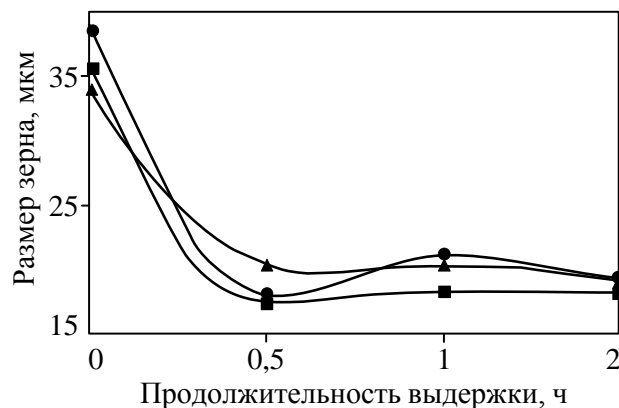


Рис. 2. Зависимость среднего размера частиц эвтектической γ' -фазы от продолжительности и температуры выдержки при 1160 (●), 1180 (■) и 1200°C (▲)

Оптимальная структура была получена после отжига при температуре 1180°C с выдержкой 0,5 ч (рис. 3). Происходит формирование зеренной структуры в частицах эвтектической γ' -фазы, а также их дробление во всем объеме образца. Следует отметить, что в застойных зонах данный процесс происходит менее активно.

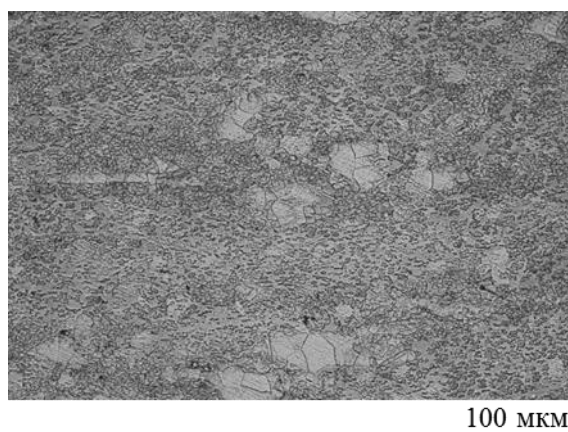


Рис. 3. Микроструктура образца из сплава системы Ni–Al–Co, деформированного при температуре 1180°C, после отжига при температуре 1180°C с выдержкой в течение 2 ч

Проведены исследования технологической пластичности при растяжении слитков из интерметаллидного никелевого сплава системы Ni–Al–Co (рис. 4). Следует отметить что напряжение течения жаропрочного никелевого сплава системы Ni–Al–Co снижается пропорционально температуре испытаний, такая зависимость характерна для данной группы сплавов. В интервале температур от 1140 до 1180°C наблюдается устойчивый рост пластичности. Снижение уровня пластичности при 1200°C обусловлено сильным окислением поверхности образцов в процессе проведения испытания. При 1140°C изменяется характер уменьшения напряжения течения, и в интервале температур от 1120 до 1140°C происходит незначительное снижение пластичности. Данное

явление может быть обусловлено увеличением концентрации частиц вторичной γ' -фазы. Для подтверждения данного предположения необходимо проведение дополнительного объема исследований.

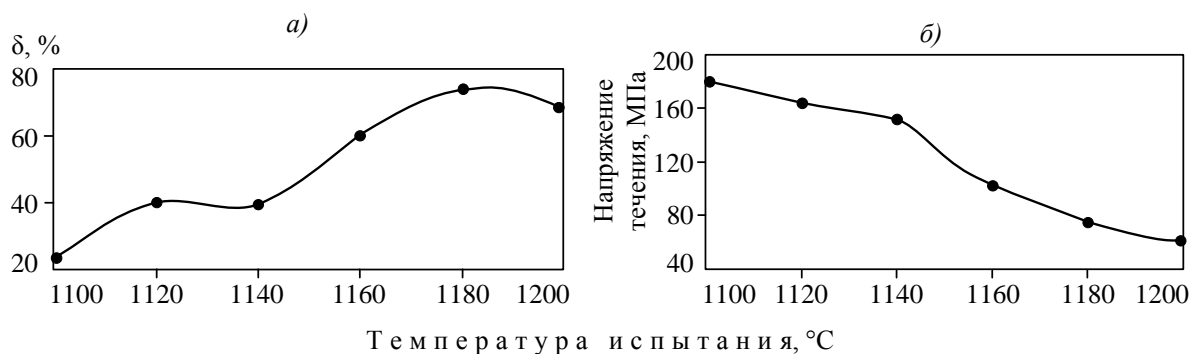


Рис. 4. Зависимость пластичности (а) и напряжения течения (б) от температуры испытаний жаропрочного интерметаллидного сплава системы Ni–Al–Co в литом состоянии

Исследуемый жаропрочный интерметаллидный сплав системы Ni–Al–Co имеет весьма узкий температурный интервал деформации, а напряжение течения данного сплава относительно высокое. Поэтому его обработку следует проводить с применением защитных технологических покрытий (ЗТП) и использованием прессов, оборудованных изотермическими установками. В первую очередь ЗТП в процессе изотермической деформации необходимо как эффективная смазка, позволяющая проводить деформацию при ограниченных усилиях пресса. Это обеспечивает высокую стойкость штампового блока, выполненного из литейного сплава ЖС6У, работающего при температуре 950°C и выше [14, 15]. В ВИАМ разработан ряд технологических покрытий различного назначения, которые успешно применяются многими предприятиями для защиты изделий при горячей штамповке и термообработке и других процессах. Однако данные ЗТП предназначены для традиционных титановых и никелевых сплавов и не подходят для сплава системы Ni–Al–Co. Для проведения деформации и термической обработки данного сплава разработано защитное технологическое покрытие ЭВТ-114, работоспособное до 1250°C. В таблице приведены результаты испытаний на жаростойкость интерметаллидных сплавов с оптимальными составами композиций технологических покрытий.

Окисляемость образцов интерметаллидного жаропрочного сплава системы Ni–Al–Co с технологическими покрытиями

Покрытие	Изменение массы образцов, кг/м ² , после термической обработки по режимам (выдержка 5 ч), °C	
	1000	1250
Без покрытия	0,020	0,050
ЭВТ-100	0,002	0,030
ЭВТ-114	0	0

Исследование влияния защитного технологического покрытия ЭВТ-114 на технологические параметры деформации жаропрочного интерметаллидного сплава системы Ni–Al–Co показало, что при деформации наблюдалось снижение усилий, прикладываемых прессом для формоизменения заготовок, что в свою очередь связано с уменьшением коэффициента трения на границе раздела «штамп–металл», а также с отсутствием окисленного слоя на поверхности заготовок, который является малопластичным.

При использовании технологических покрытий возможно увеличение допустимой степени деформации заготовок из сплава системы Ni–Al–Co, ввиду отсутствия малопластичного окисленного слоя на поверхности, приводившего к образованию трещин до достижения допустимой степени деформации в основном металле.

Обсуждение и заключения

По результатам проведенных исследований установлено, что оптимальным для деформации гомогенизированных слитков из жаропрочного интерметаллидного сплава системы Ni–Al–Co является интервал температур с 1160 до 1180°C. Снижение температуры до 1140°C может привести к образованию трещин вследствие значительного снижения технологической пластичности сплава. Наиболее оптимальная структура с точки зрения последующей деформационной обработки получена при деформации образца по следующему режиму:

- деформация со степенью не менее 60% при температуре 1180°C;
- температура окончания деформации не ниже 1160°C;
- охлаждение на воздухе;
- отжиг при температуре 1180°C, выдержка 2 ч.

Создано высокоэффективное защитное технологическое покрытие, которое обеспечивает безокислительный нагрев заготовок из жаропрочного интерметаллидного сплава системы Ni–Al–Co. В процессе деформации данное ЗТП является высокотемпературной смазкой, которая обеспечивает снижение усилия, необходимого для деформирования слитков и заготовок в 1,5–2 раза. Применение ЗТП обеспечивает достаточно легкое извлечение заготовки из штампа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения // *Крылья Родины*. 2012. №3–4. С. 34–38.
3. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 52–57.
4. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные сплавы нового поколения // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 36–52.
5. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М. Особенности легирования и термической обработки жаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей нового поколения // *Авиационные материалы и технологии*. 2010. №2. С. 3–8.
6. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Елютин Е.С. Монокристаллические жаропрочные сплавы для газотурбинных двигателей // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение»*. 2011. №SP2. С. 38–52.
7. High temperature resistant cobalt base superalloy: pat. 2010/0061883 US; publ. 11.03.10.
8. Cobalt base alloy with high heat resistance and high strength and process for producing the same: pat. 2008/0185078 Japan; publ. 07.08.08.
9. Ternary nickel eutectic alloy: pat. 2009/0136381 UK; publ. 28.05.08.
10. Iridium-based alloy with high heat resistance and high strength and process for producing the same: pat. 2008/0206090 Japan; publ. 28.08.08.
11. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 57–60.

12. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотеплонагруженных деталей газотурбинных двигателей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP4. С. 13–19.
13. Летников М.Н., Ломберг Б.С., Овсепян С.В. Исследование композиций системы Ni–Al–Co при разработке нового жаропрочного деформируемого интерметаллидного сплава // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. № 10. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru>. (дата обращения: 21.05.2015).
14. Пономаренко Д.А., Розененкова В.А., Скугорев А.В., Шишков С.Ю. Эффективное использование защитных технологических покрытий при изотермической штамповки на воздухе сложнопрофильных деталей из титановых сплавов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2014. №9. С. 44–48.
15. Пономаренко Д.А., Моисеев Н.В., Скугорев А.В. Эффективная технология изготовления дисков ГТД из жаропрочных никелевых сплавов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2013. №10. С. 13–17.