

ИНТЕРМЕТАЛЛИДЫ НА ОСНОВЕ ТИТАНА И НИКЕЛЯ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ НОВОЙ ТЕХНИКИ

Академик РАН **Е. Н. КАБЛОВ, В. И. ЛУКИН**, д-р техн. наук (ФГУП «ВИАМ», г. Москва, РФ)

Наиболее важной задачей современного материаловедения является проблема разработки новых легких жаропрочных материалов. Современные жаропрочные материалы, основанные на твердорастворном и дисперсионном упрочнении металлической матрицы, не могут в полной мере удовлетворить требования, выставляемые конструкторами перспективных изделий авиакосмической техники. Решить эту задачу можно с помощью новых жаропрочных материалов на основе интерметаллидов. Наиболее интересными для этих целей являются интерметаллиды, образованные переходными металлами и алюминием, чаще называемые алюминидами. Отмечены достижения США в этой области.

Ключевые слова: жаропрочные сплавы, интерметаллиды, авиационные ГТД, энергетическое оборудование, композиционные материалы, рабочие лопатки, жаровые трубы, монокристаллическая структура, соединение

Алюминиды титана. Проблема повышения температурного интервала применения титановых сплавов в газотурбинных двигателях (узлы, камеры низкого (КНД) и высокого (КВД) давления и др.) остается по-прежнему актуальной. Ее решение позволит резко увеличить массовую отдачу двигателя, что является первоочередной задачей при создании двигателей нового поколения.

В настоящее время как у нас, так и в ведущих зарубежных авиационных фирмах созданные жаропрочные титановые сплавы надежно обеспечивают длительную эксплуатацию деталей до 550 и кратковременную («забросы») до 600 °С.

До недавнего времени усилия большинства исследователей были направлены на создание сплавов на основе интерметаллидов Ti_3Al (« α -2»-фаза) и $TiAl$ (γ -фаза), поскольку именно они могли принести наиболее существенный выигрыш как в массовой отдаче, так и в расширении температурного интервала вплоть до 800 °С.

Однако решить проблему повышения пластичности этих сплавов при комнатных температурах до сих пор полностью не удалось. Поэтому, несмотря на значительный объем исследований и наметившиеся новые подходы к использованию и проектированию деталей из алюминидов титана, позволяющие применять сплавы с существующим уровнем свойств, промышленного применения эти материалы до сих пор практически не получили.

ВИАМ в свое время был пионером в области исследования возможности создания конструкционных материалов на базе алюминидов титана. Были проведены обширные исследования по влиянию различных легирующих элементов на свой-

ства алюминидов различного состава, определены параметры технологии фасонного литья и деформационной обработки, была отработана технология модифицирования алюминидов при их выплавке и т. д.

К настоящему времени известны алюминидные титановые сплавы Ti_3Al (« α -2»-фаза. В США — «супер α -2»-сплавы, в РФ — сплав ВТИ-2); Ti_2AlNb («орто»-фаза) «орто»-сплавы, сплав «22-23» (США), ВТИ-4 (РФ) и $TiAl$ (γ -фаза, «46-1-1», США), ВТИ-3 (РФ), которые отличаются повышенными удельной жаропрочностью, усталостью и стойкостью к окислению по сравнению с титановыми сплавами.

Достигнутый уровень механических свойств интерметаллидных сплавов на основе фаз Ti_3Al (супер « α -2»-сплавы), Ti_2AlNb («орто»-сплавы) и $TiAl$ (γ -сплавы) представлен в работе [1]. Анализ полученных механических свойств показал, что современные «супер α -2» и γ -сплавы не могут удовлетворять требованиям конструкторов — они остаются низкими и улучшение их в дальнейшем не предвидится. Поэтому основные усилия были сосредоточены на разработке сплавов, основанных на «орто»-фазе [2]. Основными преимуществами этих сплавов являются:

высокие прочностные и пластические характеристики;

низкий коэффициент термического расширения;

высокие характеристики МЦУ и МнЦУ;

лучшие жаропрочные свойства при температурах 500...650 °С;

хорошая жаростойкость до температур 700 °С.

Основу «орто»-сплавов составляет интерметаллид Ti_2AlNb (Ti-25Al-25Nb, ат. %), имеющий упорядоченную орторомбическую решетку. Температура разрушения дальнего порядка, в зависимости от состава, примерно 900...925 °С, а исчезновение ближнего порядка не наблюдается до температур 1600 °С [3].

«Орто»-фаза стабильна до температуры примерно 625 °С, выше которой в структуре ее появляется упорядоченная «В2»-фаза с решеткой ОЦК. Положение областей существования «орто», «В2» и «α-2»-фаз представлено на рис. 1.

Имея более высокую температуру плавления, низкий коэффициент термического расширения, большую низкотемпературную прочность и пластичность, «орто»-фаза при температурах 650...750 °С имеет меньший темп снижения модуля упругости, что свидетельствует о ее потенциальных жаропрочных свойствах.

При создании «орто»-сплавов в качестве легирующих элементов используются тугоплавкие элементы — молибден, ванадий, титан, вольфрам и цирконий. Выбор указанных элементов обусловлен тем, что они повышают упругие и прочностные свойства тройных сплавов Ti–Al–Nb, снижают окисляемость, в результате изменения фазового состава и структурных превращений позволяют сформировать оптимальные типы структур, улучшающие характеристики пластичности и надежности. Для повышения жаропрочных свойств в сплавы вводится кремний и углерод, которые за счет образования сложных силицидов и карбидов повышают температурные характеристики — кратковременную и длительную прочность композиций.

К настоящему времени известны несколько сплавов этого типа — ВТИ-4 (РФ), Ti-22-23 (США), Ti-22-20-3 (Китай), Ti-22-20-2 (Япония) и Ti-22-25-2-0,5 (Франция). Основа сплавов состоит из Ti-(20-23)Al-(20-25)Nb-(1-5) (ат. %), других элементов — V+Mo+Zr+Si (ВТИ-4), Та (Китай), W (Япония), (Mo+Si) (Франция) [4].

По фазовому составу это двухфазные «орто+В/В2» или трехфазные «орто+В/В2+(следы α-2)»-сплавы. В зависимости от режимов термообработки сплавы могут содержать до (65...85) (об. %) «орто»-фазы, обеспечивающей жаропрочность, и (15...35) (об. %) пластичной В/В2-фазы, которая повышает прочностные, пластические и технологические свойства сплавов.

Разработанные на сегодня «орто»-сплавы отличаются достаточно высокой прочностью ($\sigma_B^{20} > 1100$ МПа), относительно хорошей пластичностью ($\delta^{20} > 5$ %) и жаропрочностью ($\sigma_{100}^{650} > 350$ МПа), имеют повышенную жаростойкость (до 700 °С) в отличие от традиционных титановых сплавов. Таким образом, «орто»-сплавы вполне могут заменить жаропрочные стали и никелевые сплавы, используемые в роторе и статоре КВД, с большим выигрышем по массе узлов и деталей (удельный вес «орто»-сплава 5,1 г/см³, а используемых никелевых сплавов 7,5...8,0 г/см³). Кроме того, дополнительный выигрыш массы может быть обеспечен и в резуль-

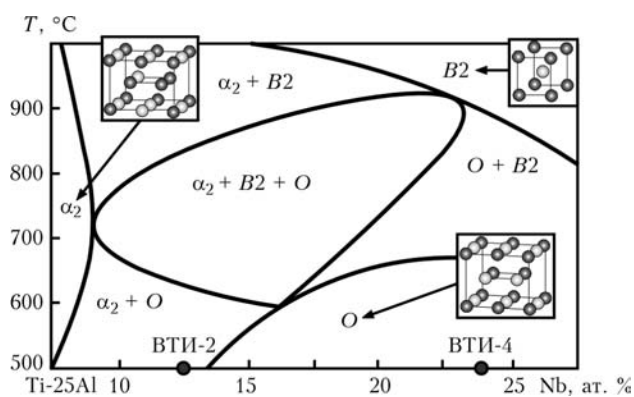


Рис. 1. Фазовый состав сплавов на основе фаз Ti₃Al (α-2) и Ti₂AlNb («орто»)

тате замены материала статорных деталей секций КВД традиционными титановыми сплавами, которые из соображений пожаробезопасности изготавливаются в настоящее время из сталей.

Однако несмотря на достоинства этих сплавов, за рубежом до сих пор не используется какой-либо «орто»-сплав. По-видимому, это связано с тем, что подобные сплавы оказались достаточно сложными в металлургическом производстве. Необходимость использования для легирования более дорогих элементов — ниобий, тантал и вольфрам при повышенном содержании их в сплавах, обеспечение высокой однородности состава слитков, применение прокатного и термического оборудования с защитной атмосферой (вакуумом или инертным газом), жесткий контроль макро и микроструктуры в полуфабрикатах — главные причины торможения промышленного освоения этого класса сплавов [5].

Тем не менее, существуют реальные предпосылки и технические возможности преодоления многих из указанных трудностей. Это достигается путем разработки экономнолегированных «орто»-сплавов и использования технологии производства титановых сплавов, позволяющих за счет твердорастворного, дисперсионного и структурного упрочнения упорядоченной «орто»-фазы сохранить хорошую технологичность при сохранении приемлемой жаропрочности таких сплавов.

Используя дополнительное легирование, операции горячей деформации и термической обработки, можно изменить структуру полуфабрикатов и существенно повысить жаропрочные свойства, несколько снизив характеристики пластичности, что обеспечит перспективным «орто»-сплавам повышение температуры эксплуатации до 700 °С. В ВИАМ для сплава ВТИ-4 разработана технологическая документация на опытное производство слитков, слябов, тонких листовых полуфабрикатов (ленты и фольга), обеспечивающая получение в конечных полуфабрикатах гарантированных уровней механических свойств, отра-

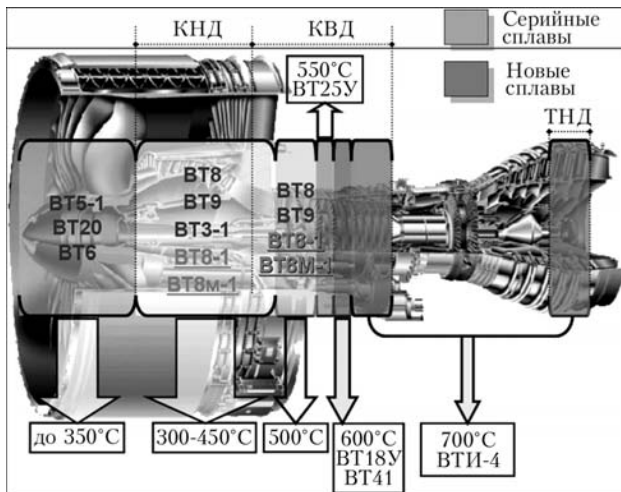


Рис. 2. Жаропрочные титановые сплавы в газотурбинных двигателях

ботана технология получения компактных многослойных заготовок.

Расчеты и имеющиеся к настоящему времени результаты разработок показывают, что только композиционные материалы (КМ) — пластичная интерметаллидная матрица + высокопрочные неорганические волокна имеют потенциальную возможность удовлетворить большинству требований к перспективным высоконагруженным конструкциям двигателя и самолета [3–8]. На сегодня основными препятствиями для производства КМ с интерметаллидной матрицей является несоответствие коэффициентов термического расширения (КТР) матрицы и волокна, что вызывает образование остаточных растягивающих напряжений и зоны химического взаимодействия между ними. Для решения проблем соответствия КТР и химической совместимости компонентов КМ проводятся исследования по разработке функциональных покрытий для волокон, сглаживающих указанные различия в КТР и снижающих зону реакционного взаимодействия до минимальных значений.

В последние годы появляется большое количество работ, посвященных поиску совместимых с волокнами интерметаллидных матриц, изучению строения реакционной зоны и влиянию на нее различных параметров получения КМ, их стабильности в процессе эксплуатации, что позволит обеспечить высокие характеристики такого материала. Примером такого подхода может служить разработка в США КМ с интерметаллидной матрицей на основе «орто»-сплава (сплав марки «22-23»), упрочненного высокомодульным волокном на основе карбида кремния β -SiC (35 об. %).

В ВИАМ была разработана технология получения модельных образцов КМ (матрица — сплав ВТИ-4 + волокна В/В4С), которая обеспечивала получение монолитного КМ с полным затеканием

матрицы в межволоконные пространства и отсутствием несплошностей и карманов на границе раздела смежных слоев ленты. Зона реакционного взаимодействия между волокном и матрицей не превышала 0,5 мкм. Опробование этой технологии с волокнами карбида кремния не проводилось вследствие отсутствия качественного материала волокон.

Области применения разработанных сплавов на основе алюминидов титана приведены на рис. 2.

Новым направлением в развитии γ -сплавов является исследование композиций с повышенным содержанием тугоплавких элементов и наличие бора, углерода и кремния. Эти многофазные литые материалы представляют собой интерметаллид TiAl и высоколегированную β -фазу, упрочняемую карбидами, силицидами и боридами. Предполагается, что опытные композиции таких сплавов будут иметь $\sigma_{сж}^{20} = 1000$ МПа, $\epsilon_{сж}^{20} = 15$ % и $\sigma_{сж}^{1000} / \gamma = 100$ МПа/кг/м³. Практическое использование таких материалов будет зависеть от решения вопросов повышения низкотемпературных характеристик надежности и снижения окисляемости при рабочих температурах.

Особый интерес в качестве жаропрочных материалов представляют сложные химические соединения — карбосилициды титана — Ti_3SiC_2 и $Ti_3Al-Si-C/B$, дополнительно легированные тугоплавкими элементами. Подобные композиции представляют собой литые эвтектические сплавы, которые по свойствам близки к керамическим материалам. Эти сплавы отличаются высокой удельной жаропрочностью и жаростойкостью и их предполагается использовать при температурах до 900°C. Однако эти работы находятся в начальной стадии исследований, поскольку не решены вопросы взаимосвязи «структура–свойства–надежность» таких композиций, а также технологии производства деталей (в частности, КВД и ТНД).

Поскольку жаропрочные алюминиды титана (в особенности α -2 и γ -сплавы) имеют невысокие технологические свойства, становится очевидным, что необходимо разрабатывать новую технологию его переработки. Анализ показал, что наиболее перспективной технологической цепочкой является следующая: выплавка сплава в индукционной установке с медным секционным тиглем, отливка фасонных заготовок для изготовления деталей и доштамповка фасонных заготовок в условиях изотермической деформации до конечных размеров.

Алюминиды титана на основе « α -2», «орто»- и γ -сплавов могут широко применяться в транспортном машиностроении (двигателе- и автомобилестроении). Научно-технический задел, который имеется в институте, позволяет создать эф-

фективное производство клапанов и рабочих колес агрегатов турбонаддува в дизельных и поршневых двигателях, что обеспечит высокую надежность и коррозионную стойкость конструкций. В таких отраслях, как газо- и нефтеперерабатывающие установки химической промышленности, а также атомное машиностроение, где требования к жаропрочным материалам менее жесткие и требуются специфические характеристики — коррозионная стойкость и стойкость к разбуханию под действием излучения [4, 5, 8–10], γ -сплавы также могут найти применение.

Алюминиды никеля. В настоящее время детали и узлы горячего тракта ГТД (сопловые и рабочие лопатки ТВД и ТНД, жаровые трубы, створки реактивного сопла и другие) изготавливаются из жаропрочных сплавов на основе никеля/кобальта, упрочняемых интерметаллидной фазой Ni_3Al (« γ' »-фаза), карбидами и боридами. Повышение рабочих температур газа перед турбиной и увеличение срока службы деталей требует увеличения в составе сплавов количества тугоплавких элементов, таких как вольфрам, молибден, тантал, рений и др., что приводит к повышению их плотности и стоимости. Это стимулирует поиск новых основ создания жаропрочных материалов с пониженной плотностью, экономичным составом, способных длительно работать в окислительных средах при температурах 1100...1300 °С.

В отличие от никелевых жаропрочных сплавов интерметаллиды Ni_3Al и $NiAl$ отличаются пониженной плотностью (соответственно 7,3 и 5,9 г/см³), высоким модулем упругости, сопротивлению окислению, что делает их перспективными для использования в качестве матричного материала.

Диаграмма состояния системы никель-алюминиевых сплавов приведена на рис. 3.

Интерметаллиды Ni_3Al и $NiAl$ имеют упорядоченную кристаллическую решетку, что обеспечивает им повышенную стабильность структур из-за значительного торможения процессов, контролируемых диффузией. Высокая термическая стабильность этих соединений обеспечивает повышение их жаропрочности при меньшем содержании тугоплавких элементов.

Исследования в области создания сплавов на основе алюминидов никеля как в нашей стране, так и за рубежом начались в середине 1980-х годов. Так, например, в США разработано и запатентовано пять сплавов на основе Ni_3Al (типа IC-438) для сопловых лопаток наземных ГТД, тепловых экранов металлургических печей, рольгангов для обжига посуды и др. узлов и деталей различного назначения [11–16]. Основными недостатками зарубежных сплавов является то, что они по параметрам жаропрочности уступают сплавам

на основе никеля, и кроме того, они не опробованы в крупных силовых конструкциях ГТД.

Основной задачей исследований ВИАМ совместно с рядом институтов РАН являлось выяснение основных факторов, влияющих на жаропрочность интерметаллидов Ni_3Al и $NiAl$ и создание на их основе конструкционных материалов, не уступающих по уровню жаропрочности промышленным никелевым сплавам, и отличающихся от них пониженной плотностью, экономичным химическим составом и работоспособностью в условиях авиационных ГТД при температурах до 1200...1300 °С в агрессивной окислительной среде.

В настоящее время наиболее актуальной проблемой является создание конструкционных материалов для статорных деталей горячего тракта ГТД — сопловых лопаток и деталей камер сгорания, которые являются наиболее массивными частями авиационных двигателей.

Исследования в области технологии изготовления интерметаллидных сплавов на основе соединения Ni_3Al позволили выявить два фактора, влияющих на стабильность их свойств и жаропрочность: во-первых, повышенное количество газовых и других примесей, концентрирующихся на границах зерен; во-вторых, уменьшение пористости в литье.

Исследования, проведенные в ВИАМ, позволили разработать технологии выплавки легированных сплавов на основе интерметаллидов Ni_3Al и $NiAl$ с минимальным содержанием серы, кислорода и азота, обеспечивающих высокую химическую однородность слитков. Для уменьшения пористости в литых полуфабрикатах и деталях была разработана технология высокоградIENTной кристаллизации и создано специальное оборудование, позволяющее уменьшить пористость отливок с 0,2 до 0,02...0,05 %.

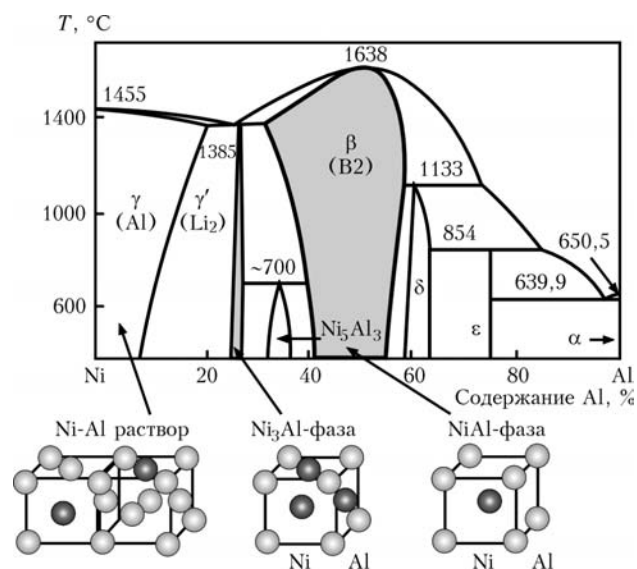


Рис. 3. Диаграмма состояния системы Ni–Al

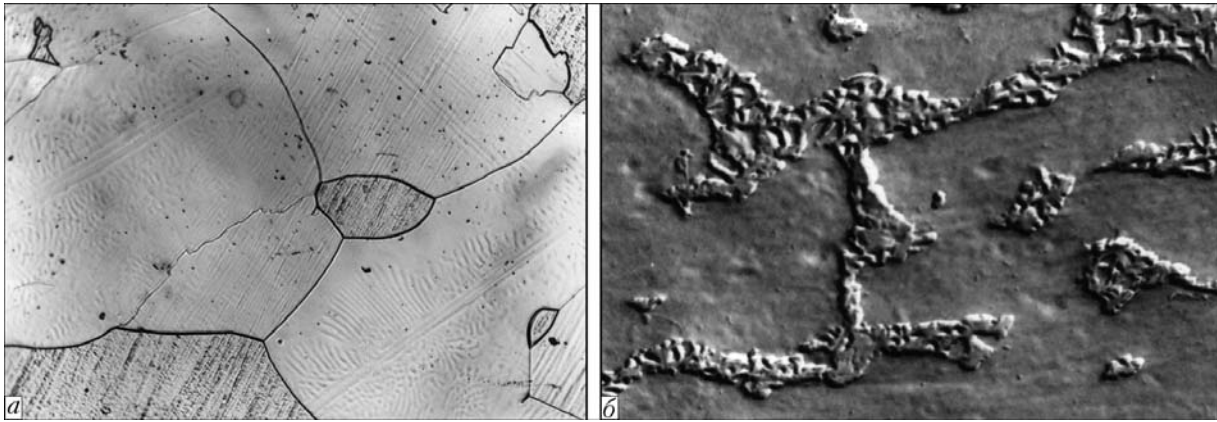


Рис. 4. Микроструктура сплава на основе Ni₃Al в системе Ni–Al–Cr–Mo–W: а — твердый раствор на основе Ni₃Al (×250); б — участки с выделениями γ + γ'-фазы по границам твердого раствора (×10000)

Для создания жаропрочных сплавов на основе интерметаллида Ni₃Al исследовали влияние химического и фазового состава на жаропрочность интерметаллида Ni₃Al при температуре 1200 °С, оптимизировали технологию получения полуфабрикатов (прутков) с целью изучения жаропрочных свойств и выявления преимуществ перед серийными никелевыми сплавами.

Установлено, что оптимальные свойства при температуре 1200 °С при испытании в воздушной среде имеет интерметаллидное соединение Ni₃Al, в котором часть атомов никеля заменена хромом или кобальтом, а часть атомов алюминия — хромом, титаном, вольфрамом и молибденом.

Было показано, что однофазные сплавы при температуре 1200 °С не жаропрочны, так как в процессе испытания на длительную прочность разрушаются хрупко. Повышение жаропрочности интерметаллида Ni₃Al в системе сплавов Ni–Al–Cr–W–Ti–Mo при температуре 1200 °С достигается при оптимизации фазового состава.

Высокая жаропрочность при температуре 1200 °С наблюдалась у сплава, сохраняющего в интерметаллидной матрице небольшое количество γ- и β-фаз (твердые растворы на основе никеля и NiAl). При одинаковом химическом составе са-

мую высокую жаропрочность при температуре 1100 °С имеют сплавы, полученные литьем с монокристаллической структурой. При этом менее жаропрочными оказались сплавы, полученные путем деформации и последующего рекристаллизационного отжига.

Микроструктура твердого раствора на основе Ni₃Al и сплава на его основе с прослойками γ+γ'-фаз приведена на рис. 4. Наличие в объеме зерна небольшого количества пластичной γ-фазы и выделение по границам зерен упрочняющих фаз исключает охрупчивание материала по границам и, как следствие, повышает жаропрочность.

Выявленные факторы, связывающие технологию получения, химический и фазовый состав композиций на основе Ni₃Al, позволили разработать, паспортизировать и опробовать в промышленности конструкционные литейные жаропрочные сплавы марки ВКНА (ВИАМ, конструкционный, никель-алюминиевый) для деталей горячего тракта серийных и перспективных ГТД с рабочими температурами до 1200...1250 °С.

В таблице приведены основные свойства паспортизованных материалов при температурах 20, 900, 1100 и 1200 °С и их оптимальная структура в отливках. Отмечается, что эти интерметаллид-

Механические свойства литейных сплавов на основе интерметаллида Ni₃Al

Марка сплава, паспорт	Структура отливок	Плотность, кг/м ³	Механические свойства при температурах, °С							
			20			900		1100		1200
			σ _в , МПа	δ, %	σ ₋₁ , МПа (при 2·10 ⁷ цикл)	σ ₁₀₀ , МПа	σ ₋₁ , МПа (при 2·10 ⁷ цикл)	σ ₁₀₀ , МПа	σ ₋₁ , МПа (при 2·10 ⁷ цикл)	σ ₁₀₀ , МПа
ВКНА-4, № 1484	Поликристаллическая	7840	720	11,5	150	230	250	55	100	23
ВКНА-1В, № 1649	Дендритная столбчатая	7938	740	50	130	250	240	65	120	43
ВКНА-4У, № 1598	» »	7910	770	30	230	280	310	95	150	45
ВКНА-25, № 1775	Монокристалл <111>	8104	1120	10	240	420	370	130	—	48

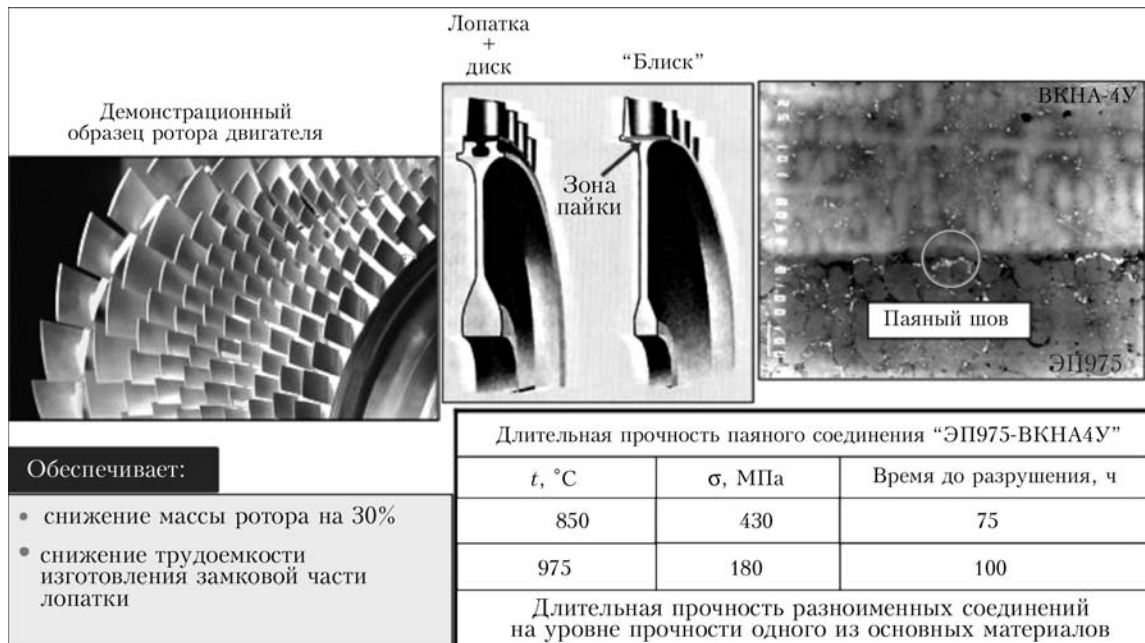


Рис. 5. Высокотемпературная пайка деталей ТВД/ТНД для изготовления конструкции типа «блиск»

ные сплавы имеют хорошую технологичность при отливке деталей методом точного литья по выплавляемым моделям, и по свойствам не уступают серийному никелевому сплаву ЖС6У.

Опробование этих сплавов в производственных условиях на ряде предприятий для получения цельнолитых сопловых аппаратов малоразмерных ГТД, показало возможность снижения трудоемкости их изготовления.

Наиболее жаропрочным материалом на основе интерметаллида Ni_3Al является литейный монокристаллический сплав марки ВКНА-25.

Сплав ВКНА-25 имеет хорошие литейные свойства, что позволило разработать технологию литья малоразмерных лопаток с регламентированной монокристаллической структурой.

Особенностью интерметаллидных материалов является пониженная плотность по сравнению с никелевыми аналогами. Технологическое и эксплуатационное опробование интерметаллидных материалов показало, что их применение позволяет снизить трудоемкость и энергозатраты при изготовлении деталей на 15...20 %, так как интерметаллидные материалы используются в литом состоянии без упрочняющей термической обработки. При отливке неохлаждаемых деталей, взамен охлаждаемых из никелевых сплавов, значительно повышается выход годного и появляется возможность повышения рабочих температур с 1050 до 1100 °С и ресурса в 3-4 раза.

Изготовление конструкций «блиск» из монокристаллических и деформируемых жаропрочных сплавов возможно только при использовании технологий, обеспечивающих высокую жаропрочность соединений разнородных никелевых сплавов. Поскольку литые жаропрочные и высокожара-

ропрочные дисковые никелевые сплавы являются несвариваемыми из-за склонности к образованию кристаллизационных и термических трещин, пайка припоями на никелевой основе является почти единственной возможностью получения соединений с высокой жаропрочностью, сравнимой с жаропрочностью основного материала (рис. 5.).

Для разнородного сочетания материалов существенным является обеспечение совместимости термообработок основных материалов между собой и с режимом пайки, чтобы обеспечить регламентированную структуру и, соответственно, паспортные характеристики свойств каждого из соединяемых материалов.

При этом необходимо отметить, что структуры соединяемых разнородных никелевых сплавов отличаются между собой. Сближение структур шва структурам соединяемых материалов определяется по следующим признакам: отсутствие в середине шва эвтектических структур, содержащих прослойки и цепочки структурных составляющих — боридов, силицидов, интерметаллидов; близкая морфология выделений упрочняющей γ' -фазы как в шве, так и в одном из соединяемых материалов. В случае соединения монокристаллов шов будет определяться как граница зерна между монокристаллом и деформированным сплавом.

В заключение следует отметить, что анализ отечественных и зарубежных разработок по интерметаллидным сплавам на основе алюминидов титана и никеля показал, что они являются перспективными жаропрочными материалами как в монокристаллическом, так и в виде композиционных материалов, как для новых изделий авиационно-космического назначения, так и для отраслей, в которых используются жаропрочные материалы — транс-

портном машиностроении (двигателе- и автомобилестроении). Нарботки, имеющиеся в ВИАМ, позволяют создать достаточно эффективное производство ряда деталей, что обеспечит высокую надежность и коррозионную стойкость конструкций.

Применение интерметаллидных сплавов на титановой и никелевой основах позволяет значительно улучшить технические характеристики современных двигателей и элементов конструкций летательных аппаратов, снизить их массу на 20...30 %, стоимость деталей и узлов на 25...30 %, увеличив ресурс в 1,5...3 раза.

1. Иванов В. И., Ясинский К. К. Эффективность применения жаропрочных сплавов на основе интерметаллидов Ti₃Al и TiAl для работы при температурах 600...800 °С в авиакосмической технике // Технология легких сплавов. — 1996. — № 3. — С. 63–68.
2. Carol A. Gintly, Hugh R. Gray. 24th Intern. SAMPE Technical conf. 20–22 Oct., 1992. — P. 1029–1093.
3. Mirachle D. B., Smith P. R., Graves J. A. Intermetallic matrix composites III / Ed. J. A. Graves, P. R., Bowman. J. J. Lewandovski // Mat. Res. Soc. Symp. Proceeding. — 1994. — 350. — P. 133–142.
4. Kumpfert J., Kaysser W. A. Orthorhombic titanium aluminides: phases, phase transformations and microstructure evolution // Zeitschrift fuer Metallkunde. — 2001. — 92, № 2. — P. 128–134.
5. Kumpfert J. Intermetallic alloys based on orthorhombic titanium aluminide // Adv. Eng. Materials. — 2001. — 3, № 11. — P. 851–864.

6. Russ S. M., Boechlert C. J., Eylon D. // Mater. Sci. and Eng. — 1995. — A192/193. — P. 483–489.
7. Potential application of ceramic matrix composites to aero-engine components / H. Ohnabe, S. Masaki, M. Onozuka, K. Miyahara et al. // App. Sci. and Manufacturing. — 1999. — 30. — P. 489–496.
8. Анташев В. Г., Иванов В. И., Ясинский К. К. Разработка технологии получения литых деталей из интерметаллидного сплава TiAl и их использование в конструкциях // Технология легких сплавов. — 1996. — № 3. — С. 20–23.
9. Eirod Ch. W. ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air, G. A. — United States, 16–19 June, 2003 [COD], 2003. — P. 1223–1230.
10. Titan und titanlegierungen: VCH Verlag GmbH and Co. / M. Peters, J. Hemptennaucher, J. Kumpfer et al. // KGA, Germany, 2002. — P. 1–37.
11. Обзор иностранной литературы: «Разработка и применение перспективных интерметаллидных систем на никелевой основе для горячего тракта ГТД». — М.: ВИАМ, 2003.
12. Raj S. V., Locci I. E., Whittenberge J. D. Development & evaluation of directionally-solidified NiAl/(Cr,Mo)-based eutectic alloys for airfoil applications // 3 Intern. symp. «Structural Intermetallics», 2001.
13. Сборник. NASA «Research & Technology», 2001. — С. 34–36
14. Walston W. S., Darolia R. Structure, properties & application of NiAl eutectic alloys // 3 Intern. symp. «Structural Intermetallics», 2001.
15. Palm M., Sauthoff G. Characterization & processing of an advanced intermetallic NiAl-base alloy for high-temperature applications // Ibid.
16. Высокотемпературные конструкционные материалы на основе интерметаллида Ni₃Al / В. П. Бунтушкин, Е. Н. Каблов, Е. Б. Качанов, Р. Е. Шалин // Авиационные материалы на рубеже XX–XXI веков. — М., 1994.

The most important task of modern materials science is development of advanced light high-temperature materials. Modern high-temperature materials based on solid-solution and dispersion strengthening of the metal matrix, cannot fully meet the requirements made by designers of advanced aerospace products. This task can be solved using advanced high-temperature materials based on intermetallics. The most attractive for these purposes are intermetallics formed by transition metals and aluminium, more often called aluminides. US achievements in this field are noted.

Поступила в редакцию 21.03.2008

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

Решением Президиума ВАК Российской Федерации от 4 июля 2008 г. журнал «Автоматическая сварка» включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.