

Thermomechanical behavior of intermetallic Ni-Al-Co and Ti-Al-Nb based alloys during isothermal deformation

E.N. Kablov, O.G. Ospennikova, V.V. Kucheryaev[†], V.A. Rosenenkova, N.A. Mironova,
D.V. Kapitanenko
[†]kudria01@mail.ru

FSUE "All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials", 17, Radio St., Moscow, Russia, 105005

Different plastic deformation thermo-mechanical terms were tried out on Ni-Al-Co-based alloy in cast, prepressed and deformed conditions, and on Ti-Al-Nb-based alloy in cast and deformed conditions by yielding specimens with varying rate of deformation in interval between 10 and 70% and varying deformation temperature in interval between 900 and 1200°C. Diagrams of tensile strength and elongation upon temperature dependence in Ni-Al-Co-based alloy in cast prepressed and deformed conditions and Ti-Al-Nb-based alloy in cast and deformed conditions are designed. Application features of protective technological coating based on glass enamel in isothermal forging of workpiece are examined. The results of heat-resistance tests on Ni-Al-Co and Ti-Al-Nb-based alloys coated with different compositions of protection technological coating are shown. During the deformation these technological coatings have to be high temperature lubricant, that reduce force up to two times, necessary to deform workpiece. These protection technological coatings can be used at temperatures under 1250°C. The results of the work show, that optimal temperature for deformation intermetallic Ni-Al-Co-based superalloy workpiece were between 1140 and 1160°C. Dropping temperature below 1140°C leads to crack growing because of significant reduction of ductility. The results of the work show, that optimal temperature for deformation intermetallic Ti-Al-Nb-based workpiece were between 1150 and 1200°C.

Keywords: intermetallic superalloy, Ni-Al-Co-based alloy, Ti-Al-Nb-based alloy, rheology, mechanical properties, gas turbine engines, technological coating, rheological properties.

Термомеханическое поведение интерметаллидных сплавов систем Ni-Al-Co и Ti-Al-Nb при изотермической деформации

Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Кучеряев В.В.[†], Розененкова В.А., Миронова Н.А.,
Капитаненко Д.В.
[†]kudria01@mail.ru

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» ГНЦ РФ,
ул. Радио д. 17, г. Москва, Россия, 105005

В ходе работы были опробованы режимы деформации методом прямой осадки образцов из интерметаллидного жаропрочного сплава системы Ni-Al-Co в литом, подпрессованном и деформированном состояниях и образцов из интерметаллидного жаропрочного сплава системы Ti-Al-Nb в литом и деформированном состояниях со степенями деформации от 10 до 70% в интервале температур от 900 до 1200°C. Построены графики зависимостей предела прочности и относительного удлинения от температуры в литом, подпрессованном и деформированном состояниях для сплава системы Ni-Al-Co и в литом и деформированном состояниях для сплава системы Ti-Al-Nb. Рассмотрены особенности применения защитных технологических покрытий на основе стекломалей при изотермической штамповке заготовок из сплавов систем Ti-Al-Nb и Ni-Al-Co. Приведены результаты испытаний на жаростойкость интерметаллидных сплавов систем Ni-Al-Co и Ti-Al-Nb с оптимальными составами защитных технологических покрытий. В процессе деформации данные защитные технологические покрытия являются высокотемпературной смазкой, которая обеспечивает снижение усилия, необходимого для деформирования заготовок в 1,5–2 раза, также применение защитных технологических покрытий обеспечивает достаточно легкое извлечение заготовки из штампа.

Показана работоспособность применяемых защитных технологических покрытий до температуры 1250°C. По результатам проведенных исследований установлено, что оптимальным для деформации заготовок жаропрочного интерметаллидного сплава системы Ni-Al-Co является интервал температур от 1140 до 1160°C. Снижение температуры ниже 1140°C приводит к образованию трещин в следствие значительного снижения технологической пластичности сплава. По результатам проведенных исследований установлено, что оптимальным для деформации слитков из жаропрочного интерметаллидного сплава системы Ti-Al-Nb является интервал температур от 1150 до 1200°C.

Ключевые слова: интерметаллидный жаропрочный сплав, система Ni-Al-Co, система Ti-Al-Nb, реология, механические свойства, ГТД, технологическое покрытие, реологические свойства.

1. Введение

Анализ тенденций развития зарубежных газотурбинных двигателей для авиационной техники показывает, что при разработке ГТД нового поколения приоритетными целями на ближайшие 10 – 15 лет являются: улучшение топливной экономичности, увеличение тяги, снижение массы, уменьшение шума и вредных выбросов в атмосферу. В России для создания конкурентоспособной авиационной техники приняты государственные и отраслевые программы, в которых поставлены аналогичные цели и задачи развития 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 на уровне либо выше уровня этих свойств у существующих материалов.

В области жаропрочных дисковых сплавов 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 ФГУП «ВИАМ») помимо тщательно сбалансированного состава применены новые подходы к формированию структуры заготовки диска, что позволило реализовать преимущество этого материала по ряду характеристик (МЦУ, кратковременной и длительной прочности) в сравнении с аналогами [3, 4].

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

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

Одной из перспективных для получения дисков ГТД является система Ni-Al-Co, обладающая низкой плотностью, менее 8 г/см³ и рабочей температурой свыше 900°C. В работе [7] приведен ряд свойств деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Ni-Al-Co, улучшение которых возможно лишь за счет разработки оптимальных режимов деформации.

В настоящее время в России и за рубежом в компрессоре высокого давления (КВД) применяют традиционные титановые сплавы BT18У, BT25 (РФ), IM1834 (Англия) и Ti1100 (США) с рабочей температурой до 600°C. Применение традиционных титановых сплавов при более высоких рабочих температурах ограничено резким падением как прочностных, так и жаропрочных свойств, а также жаростойкости. Повышение рабочей температуры КВД на 50°C может быть достигнуто за счет применения интерметаллидных титановых сплавов системы Ti-Al-Nb. Данную группу сплавов целесообразно применять в КВД для повышения рабочей температуры до 650°C.

Среди жаропрочных интерметаллидных титановых сплавов [8, 9] наибольший интерес с точки зрения разработки, освоения и практического применения представляют сплавы на основе соединения Ti₂AlNb (орторомбическая фаза). Основными преимуществами таких сплавов являются хорошие технологические свойства, позволяющие изготавливать из них деформированные полуфабрикаты сложной формы, и высокие эксплуатационные характеристики.

Однако для практического применения жаропрочных интерметаллидных титановых сплавов в изделиях авиакосмической техники необходимо отработать технологии выплавки слитков, изготовления полуфабрикатов [10, 11] и режимов термической обработки [12], обеспечивающих повышение механических свойств.

Ведущие зарубежные фирмы General Electric, Rolls Royce, MTU Aero Engines и NASA проводят интенсивные исследования по изучению свойств алюминидов Ti, в том числе систем на основе интерметаллидной фазы Ti₂AlNb их применению в перспективных изделиях авиакосмической техники, авиационных ГТД, энергетическом оборудовании. Использование алюминидов титана позволит снизить вес изделий до 40%, стоимость и трудоемкость до 30%.

Данная работа направлена на изучение особенностей деформации в условиях изотермии труднодеформируемых интерметаллидных сплавов систем Ti-Al-Nb, Ni-Al-Co с применением новых композиций технологических покрытий с рабочей температурой до 1250°C.

Работа выполнена в рамках реализации комплекс-

ного научного направления 10.2. Изотермическая деформация на воздухе нового поколения гетерофазных труднодеформируемых жаропрочных сплавов. («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

2. Материалы и методы

Исследования проведены на слитках и деформированных полуфабрикатах из сплавов систем Ti-Al-Nb, ВТИ-4, полученного методом тройного вакуумно-дугового переплава, и Ni-Al-Co с расчетным составом (содержание элементов по массе) Ni — 56,8%, Co — 33,6%, Al — 7,5%, Ti — 2,1%. Слитки из сплава системы Ni-Al-Co получены методом вакуумной индукционной выплавки с последующим переплавом методом высокоградиентной направленной кристаллизации.

Изотермическую деформацию на воздухе проводили на специализированном изотермическом прессе ПА2642 усилием 1600 тс, оснащенный индукционной установкой подогрева штампового инструмента [13 – 16].

Испытания для определения технологической пластичности на растяжение при повышенных температурах проводили на испытательной машине 1958-Y10-1 в соответствии с ГОСТ 9651 – 84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах» в интервале температур от 900 до 1200°C с шагом в 50°C. Испытания по определению допустимой степени деформации методом осадки в соответствии с ГОСТ 8817 – 82 «Металлы. Метод испытания на осадку» на прессе усилием 25 тс в интервале температур от 950 до 1200°C с шагом в 50°C. Исследование микроструктуры проводили на микроскопе Zeiss Vert.A1. Оценка защитных свойств технологического покрытия проводилась термогравиметрическим методом по ГОСТ 6130 – 71 «Металлы. Методы определения жаростойкости».

3. Результаты и обсуждение

3.1. Термомеханическое поведение интерметаллидного сплава системы Ni-Al-Co

В ходе работы были опробованы режимы деформации методом прямой осадки образцов из сплава системы Ni-Al-Co в литом состоянии со степенями деформации от 10 до 70% в интервале температур от 950 до 1200°C. Установлено, что наибольшей пластичностью сплав системы Ni-Al-Co обладает при температуре 1150°C, допустимая степень деформации при данной температуре составляет 40%. Анализ микроструктуры испытанных образцов показал, что во всех образцах, осажённых в интервале температур от 950 до 1200°C со степенями деформации от 10 до 70%, присутствуют следы дендритной структуры. Данная структура существенно увеличивает анизотропию свойств в конечном полуфабрикате из-за скопления тугоплавких элементов и их соединений в осях дендритов и легкоплавких — в междендритном пространстве. Такая структура характерна для литых заготовок из жаропрочных никелевых сплавов. Для снижения микроликвации в литых

заготовках из сплава системы Ni-Al-Co был проведен гомогенизирующий отжиг при температуре 1220°C, время выдержки — 6 ч. Параметры гомогенизирующего отжига выбирали путем пробных термических обработок при варьировании температуры и времени выдержки.

После гомогенизирующего отжига проведены испытания по определению допустимой степени деформации при сжатии в интервале температур от 950 до 1200°C, степень деформации в указанном интервале температур варьировалась от 20 до 60%. Установлено, что максимально допустимая степень деформации после гомогенизации в слитках составляет 40% при температуре 1200°C. Анализ микроструктуры испытанных образцов показал, что наиболее благоприятный интервал температур для получения мелкозернистой структуры составляет 1100 – 1150°C.

Для определения допустимой степени деформации при растяжении в литом состоянии сплава системы Ni-Al-Co были проведены испытания в интервале температур от 950 до 1200°C. Результаты испытаний показали, что сплав системы Ni-Al-Co обладает наибольшей пластичностью при температуре 1200°C.

На основании анализа проведенных исследований и опыта работы с жаропрочными никелевыми сплавами выбраны термомеханические параметры деформации литых заготовок: подпрессовка в закрытом контейнере со степенью деформации 20% при температуре 1100°C, рекристаллизационный отжиг при температуре 1220°C в течение 6 часов, осадка подпрессованных заготовок при температуре 1150°C, со степенями деформации 25, 25, 50% с промежуточными подогревами.

На рисунке 1 представлены графики зависимости относительного удлинения и предела прочности сплава системы Ni-Al-Co от температуры в литом, подпрессованном и деформированном состояниях.

Из графиков на рисунке 1 видно, что наибольшей пластичностью при растяжении сплав системы Ni-Al-Co в литом состоянии обладает при температуре 1200°C, которая составляет 53%, в подпрессованном и рекристаллизованном — при температуре 1150°C, которая составляет 182%, а в деформированном — при температуре 1100°C, которая составляет 196%.

3.2. Термомеханическое поведение интерметаллидного сплава системы Ti-Al-Nb

Для оптимизации термомеханических режимов деформации литых заготовок из сплава системы Ti-Al-Nb (ВТИ-4) проводили испытания по определению допустимой степени деформации методом осадки в интервале температур от 800 до 1200°C, степень деформации в указанном интервале температур варьировалась от 10 до 70%. Установлено, что наибольшей пластичностью сплав системы Ti-Al-Nb обладает при температуре 1050°C, допустимая степень деформации при данной температуре составляет 55%. Анализ микроструктуры осажённых образцов показал, что в интервале температур от 800 до 1100°C не происходит значительных изменений в структуре, таких как рекристаллизация или коагуляция фаз. При температурах 1150 и 1200°C

и деформации свыше 40% обнаружено появление мелких зерен на границах крупных литых зерен, что свидетельствует о начале процесса рекристаллизации, причем в образце, осажденном при температуре 1200°C плотность таких рекристаллизованных зерен выше.

Для определения допустимой степени деформации при растяжении слитков из сплава системы Ti-Al-Nb проведены испытания в интервале температур от 900 до 1200°C. При температурах 1050 и 1100°C наблюдается падение пластичности, что связано с выделением α_2 -фазы, которая при выделении непрерывной оторочкой по границе зерна существенно снижает пластичность сплава. Падение пластичности сплава системы Ti-Al-Nb при температуре 1200°C связано с повышенным окислением образцов при нагреве для проведения испытания и образованием малопластичного альфированного слоя на поверхности образца, который, в свою очередь, приводит к образованию и последующему росту мелких трещин.

На основании анализа проведенных исследований выбраны термомеханические параметры деформации литых заготовок: нагрев при температуре 1200°C со скоростью нагрева не более 150°C/ч, выдержка 1 час, всесторонняя ковка при температуре 1200°C.

Для определения допустимой степени деформации при сжатии и растяжении деформированных заготовок из сплава системы Ti-Al-Nb были проведены испытания в интервале температур от 900 до 1200°C с шагом 50°C.

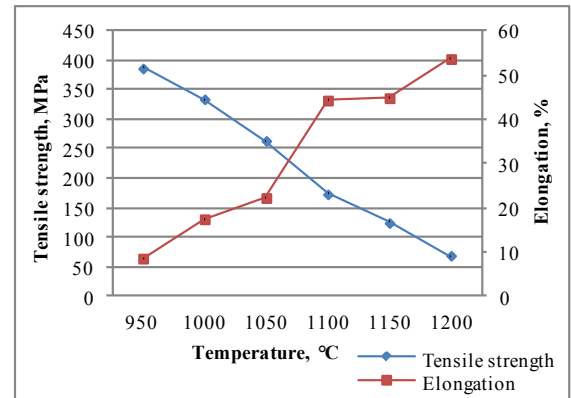
На рисунке 2 представлены графики зависимости относительного удлинения и предела прочности сплава системы Ti-Al-Nb от температуры в литом и деформированном состояниях. Относительное увеличение пластичности деформированной заготовки по сравнению с литой при температурах 1050 и 1100°C связано дроблением оторочки α_2 -фазы по границам β -зерна. Увеличение пластичности деформированных заготовок по отношению к литым связано с уменьшением среднего размера зерна, вызванного прохождением рекристаллизации в процессе деформации.

Из графиков на рисунке 2 видно, что наибольшей пластичностью при растяжении сплав системы Ti-Al-Nb в литом состоянии обладает при температуре 1150°C, которая составляет 120%, а в деформированном — при температуре 1200°C, которая составляет 160%.

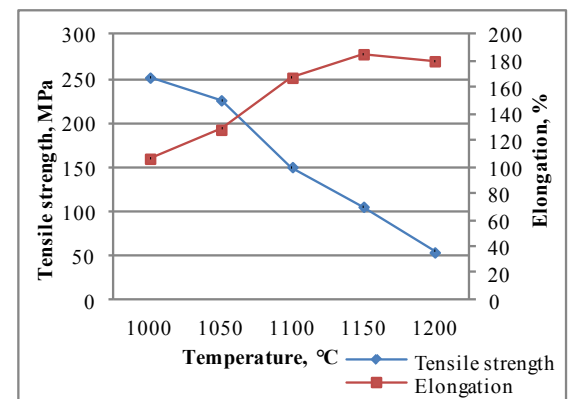
Для проведения деформации и термической обработки сплавов систем Ni-Al-Co и Ti-Al-Nb разработаны ЗТП ЭВТ114, ЭВТ113 соответственно, работоспособные до 1250°C. В таблице 1 приведены результаты испытаний на жаростойкость интерметаллидных сплавов с оптимальными составами композиций технологических покрытий.

Исследование влияния ЗТП ЭВТ114 и ЭВТ113 на технологические параметры деформации жаропрочных интерметаллидных сплавов систем Ni-Al-Co и Ti-Al-Nb 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.

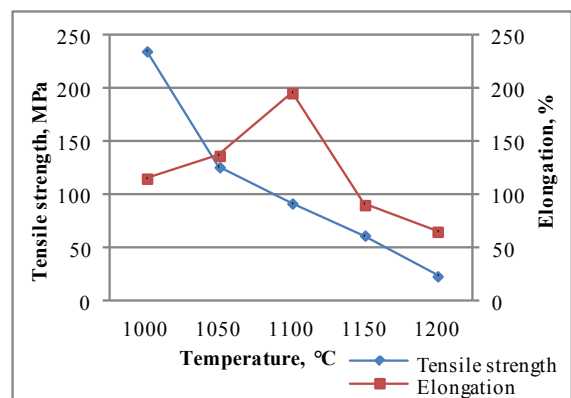
При использовании технологических покрытий возможно увеличение допустимой степени деформации заготовок из сплавов систем Ni-Al-Co и Ti-Al-Nb, ввиду отсутствия малопластичного окисленного слоя на поверхности, приводившего к образованию трещин до достижения допустимой степени деформации в основном металле.



a



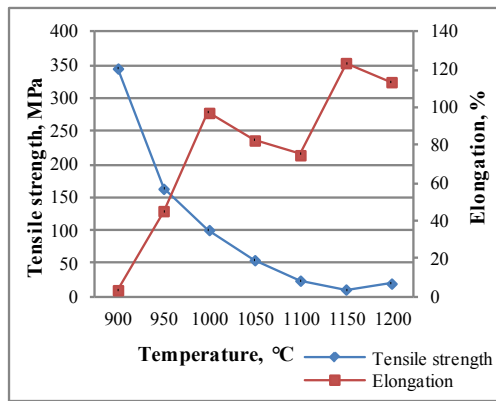
b



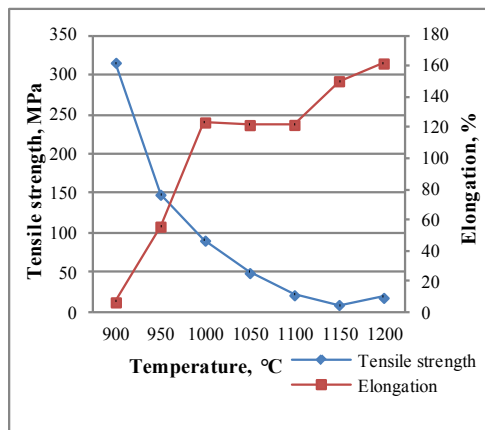
c

Рис. 1. Графики зависимости относительного удлинения и предела прочности сплава системы Ni-Al-Co от температуры в литом (а), подпрессованном (b) и деформированном (c) состояниях.

Fig. 1. Tensile strength and elongation upon temperature dependence in Ni-Al-Co-based alloy in cast (a) prepressed (b) and deformed (c) conditions.



a



b

Рис. 2. Графики зависимости относительного удлинения и предела прочности сплава системы Ti-Al-Nb от температуры в литом (а) и деформированном (б) состояниях.

Fig. 2. Tensile strength and elongation upon temperature dependence in Ti-Al-Nb-based alloy in cast (a) and deformed (b) conditions.

Табл. 1. Окисляемость интерметаллидных сплавов с технологическими покрытиями.

Table 1. Oxidability of intermetallic alloys with technological coatings.

№	Состав покрытия	Изменение веса, г	
		Additional weight, g	
	Coating composition	1000°C	1250°C
Ni-Al-Co			
1	Без покрытия	0,020	0,050
	Without coating		
2	ЭВТ100	0,002	0,030
3	ЭВТ114	0	0
Ti-Al-Nb			
4	Без покрытия	0,410	0,720
	Without coating		
5	ЭВТ24	0,030	0,120
6	ЭВТ113	0	0

4. Заключение

По результатам проведенных исследований установлено, что оптимальным для деформации заготовок жаропрочного интерметаллидного сплава системы Ni-Al-Co является интервал температур от 1140 до 1160°C. Снижение температуры ниже 1140°C приводит к образованию трещин из-за значительного снижения технологической пластичности сплава. Наиболее оптимальная структура, с точки зрения последующей деформационной обработки, получена при деформации заготовки по следующему режиму:

- деформация при температуре 1150°C со степенью не менее 60%;

- температура окончания деформации должна быть не ниже 1140°C

- охлаждение на воздухе;

По результатам проведенных исследований установлено, что оптимальным для деформации слитков из жаропрочного интерметаллидного сплава системы Ti-Al-Nb (ВТИ-4) является интервал температур от 1150 до 1200°C. Наиболее оптимальная структура, с точки зрения последующей деформационной обработки, получена при деформации слитка по следующему режиму:

- деформация при температуре 1200°C со степенью не менее 60%;

- температура окончания деформации должна быть не ниже 1150°C

- охлаждение на воздухе.

Для получения оптимальной структуры, обладающей высоким уровнем свойств после термической обработки следует снизить температуру начала деформации:

- деформация при температуре 1100°C со степенью не менее 60%;

- температура окончания деформации должна быть не ниже 1000°C

- охлаждение на воздухе.

Созданы высокоэффективные защитно-технологические покрытия, которые обеспечивают безокислительный нагрев заготовок из жаропрочных интерметаллидных сплавов систем Ni-Al-Co и Ti-Al-Nb. В процессе деформации данные ЗТП являются 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/References

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., Мазало И. С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. 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. №S. 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. Летников М. Н., Ломберг Б. С., Овсепян С. В. Исследование композиций системы Ni — Al — Co при разработке нового жаропрочного деформируемого интерметаллидного сплава // *Труды ВИАМ*. 2013. №10. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 23.03.2016 г.).
8. Ночовная Н. А., Панин П. В., Кочетков А. С., Боков К. А. Современные жаропрочные сплавы на основе гамма-алюминидов титана: перспективы разработки и применения // *МиТОМ*. 2014. №7. С. 23 – 27.
9. Ночовная Н. А., Скворцова С. В., Анищук Д. С., Алексеев Е. Б., Панин П. В., Умарова О. З. Отработка технологии опытного жаропрочного сплава на основе интерметаллида Ti²AlNb // *Титан*. 2013. №4 (42). С. 33 – 38.
10. Ночовная Н. А., Алексеев Е. Б., Ясинский К. К., Кочетков А. С. Специфика плавки и способы получения слитков интерметаллидных титановых сплавов с повышенным содержанием ниобия // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение»*. 2011. №SP2. С. 53 – 59.
11. Каблов Д. Е., Панин П. В., Ширяев А. А., Ночовная Н. А. Опыт использования вакуумно-дуговой печи ALD VAR L200 для выплавки слитков жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №2. С. 27 – 33.
12. Алексеев Е. Б., Ночовная Н. А., Скворцова С. В., Грушин И. А., Агаркова Е. О. Влияние термической обработки на структурно-фазовый состав и механические свойства титанового сплава на основе ортофазы // *Титан*. 2014. №4 (46). С. 45 – 49.
13. Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Ломберг Б. С. Комплексная инновационная технология изотермической штамповки на воздухе в режиме сверхпластичности дисков из супержаропрочных сплавов. // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 129 – 141.
14. Пономаренко Д. А., Моисеев Н. В., Скугорев А. В. Производство дисков ГТД из жаропрочных сплавов на изотермических прессах. // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №1. С. 13 – 16.
15. Пономаренко Д. А., Моисеев Н. В., Скугорев А. В. Эффективная технология изготовления дисков ГТД из жаропрочных никелевых сплавов. // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2013. №10. С. 13 – 17.
16. Разуваев Е. И., Моисеев Н. В., Капитаненко Д. В., Бубнов М. В. Современные технологии обработки металлов давлением. // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2015. №2 Ст. 3. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 24.03.2016).