

УДК 669.018.29

*Б.С. Ломберг¹, О.А. Базылева¹, М.М. Карашаев¹, М.Н. Летников¹***ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОЙ МАТРИЦЫ СИСТЕМЫ Ni–Al–Co
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ
С ПОВЫШЕННОЙ ПЛАСТИЧНОСТЬЮ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-3-10

Представлено обобщение результатов научно-технических публикаций, анализ которых позволит разработать научные основы создания нового класса жаропрочных конструкционных материалов на основе интерметаллидных матриц с повышенной пластичностью при комнатной температуре и высокой удельной прочностью при температурах до 950 °С в системе Ni–Al–Co. Показано, что сплавы системы Ni–Al–Co могут быть использованы при изготовлении роторных деталей в виде дисков газотурбинного двигателя (ГТД), работоспособных при температурах до 950 °С, а также в качестве материалов для лопаток ГТД благодаря высокой жаростойкости при температурах до 1200 °С.

Ключевые слова: сплавы системы Ni–Al–Co, интерметаллидный жаропрочный сплав, газотурбинный двигатель, удельная конструкционная прочность, термомеханическая обработка, металлургия гранул.

*B.S. Lomberg¹, O.A. Bazyleva¹, M.M. Karashaev¹, M.N. Letnikov¹***STUDY OF A HIGH-TEMPERATURE INTERMETALLIDE MATRIX
OF THE Ni–Al–Co SYSTEM FOR PRODUCING STRUCTURAL ALLOYS
WITH INCREASED PLASTICITY (review)**

A generalization of the results of scientific and technical publications is presented, the analysis of which will allow to develop scientific foundations for the creation of a new class of heat-resistant structural materials based on intermetallic matrices with increased plasticity at room temperature and high specific strength at temperatures up to 950 °C in the Ni–Al–Co system. It is shown that alloys of the Ni–Al–Co system can be used in the manufacture of rotary parts in the form of gas turbine engine discs (GTE), working at temperatures up to 950 °C, as well as materials for GTE blades due to heat resistance at temperatures up to 1200 °C.

Keywords: alloys of the Ni–Al–Co system, intermetallic high-temperature alloy, gas turbine engine, specific structural strength, thermomechanical treatment, metallurgy of granules.

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

В настоящее время приоритетным направлением развития авиационной техники нового поколения на период до 2030 г. [1–3] является совершенствование рабочих характеристик газотурбинного двигателя (ГТД), включающих повышение топливной экономичности, увеличение тяги, снижение массы, уменьшение шума и выбросов вредных веществ (NO_x, CO_x) в атмосферу. Данных показателей возможно достигнуть благодаря повышению предельных рабочих температур газа на входе в турбину [4–16].

Таким образом, создание ГТД нового поколения требует разработки для них жаропрочных сплавов с более высокими характеристиками, чем у современных никелевых суперсплавов, используемых в деталях горячего тракта авиационных ГТД [17–26], в том числе для дисков турбины. Наиболее важным аспектом в этом вопросе является повышение рабочей температуры и удельной конструкционной прочности эксплуатируемого материала, которое может быть достигнуто путем разработки новых более эффективных материалов и технологий их производства. Несмотря на значительные успехи в улучшении комплекса прочностных характеристик, рабочие температуры современных дисковых жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) не превышают 800 °С, за исключением деформируемого сплава марки ЭП975-ИД, разработанного для длительной эксплуатации при температурах до 850 °С [27, 28].

Одним из перспективных направлений создания новых конструкционных материалов для дисков турбины является разработка сплавов на основе интерметаллидных матриц системы Ni–Al–Co с применением новых технологических подходов к получению подобного рода материалов [29]. Следует отметить, что система Ni–Al–Co обладает широким выбором систем легирования на основе интерметаллидных соединений β -NiAl и γ' -Ni₃Al, когда возможно создавать сплавы на основе различных комбинаций фаз ($\gamma + \beta$; $\gamma' + \beta$; $\gamma + \gamma' + \beta$; $\gamma + \gamma'$) [3]. Сплавы данной системы [30–32] за счет интерметаллидов β -NiAl и γ' -Ni₃Al могут характеризоваться низкой плотностью, высокими жаростойкостью и прочностью, а γ -твердый раствор (Ni, Co) придает пластичность всей композиции.

Таким образом, разработка сплавов исследуемой системы будет способствовать созданию нового класса материалов с повышенным уровнем удельной конструкционной прочности при температурах вплоть до 950 °С [33, 34], что является актуальным направлением современного авиационного материаловедения.

Следует отметить, что сплавы на основе интерметаллидных матриц в системе Ni–Al–Co характеризуются пониженной пластичностью при комнатной температуре. В связи с этим необходим поиск возможностей обеспечения повышенного уровня пластичности при комнатной температуре благодаря применению специальных технологических подходов – например, технологии металлургии гранул с последующей термомеханической обработкой [35, 36], использование которой позволит увеличить технологическую пластичность обрабатываемого при последующей деформации материала за счет измельчения структурных составляющих сплава, а также за счет изотропии свойств получаемого материала во всех направлениях.

Современное состояние исследований по данной проблеме

В настоящее время работы в области создания конструкционных сплавов системы Ni–Al–Co носят в основном поисковый характер и связаны с исследованием состава и структуры различных ($\beta + \gamma$)-сплавов.

В некоторых работах [31, 33] рассмотрено использование сплавов системы Ni–Al–Co для изготовления как дисков ГТД, работоспособных при температурах до 950 °С, так и рабочих и сопловых лопаток, работоспособных при температурах до 1200 °С, для замены аналогичных деталей из современных ЖНС.

В научно-технической литературе относительно методов получения материалов системы Ni–Al–Co рассматриваются такие технологические подходы к получению ($\beta + \gamma$)-сплавов, как традиционная технология выплавки слитков заданного химического состава с последующей термомеханической и термической обработками, направленная кристаллизация, технология металлургии гранул, а также механо-химический синтез *in situ* интерметаллидных соединений, формирующихся непосредственно на этапе высокоэнергетической обработки исходных порошковых смесей.

В работах [33, 35, 36] проведен комплекс исследований по созданию конструкционных сплавов системы Ni–Al–Co для дисков ГТД [37–39], работоспособных при температурах до 950 °С. Например, в статье [33] представлено исследование влияния деформации и термической обработки на структуру и свойства сплавов системы Ni–Al–Co, расположенных в ($\beta + \gamma$)-области с разным объемным соотношением β - и γ -фаз с целью создания базы для разработки перспективных деформируемых сплавов на основе соединения в виде моноалюминида никеля (NiAl), предназначенных для работы при температуре 950 °С. В результате исследований установлено, что сплавы системы Ni–Al–Co, используемые в работе [33], обладали запасом низко- и высокотемпературной пластичности. В данной системе образовывалась структура материала, состоящая из зерен β -фазы с прослойками γ -фазы по границам. На основании полученных результатов далее в работе [35] исследовано влияние переходных металлов IV–VI групп (Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr и Mo) на структуру и фазовый состав сплавов системы Ni–Al–Co. Установлено также, что в данной системе легирования возможно появление вторичных выделений γ - и γ' -фаз в β -зернах – в сплавах, соответствующих составу Ni–(20–25) % (атомн.) Al–(32–34) % (атомн.) Co. Кроме того, показано, что содержание таких легирующих элементов, как Mo, Ta, Nb и V, не должно превышать 1–1,8 % (атомн.), а содержание Ti и Cr может достигать 3 и 12 % (атомн.). При таком соотношении легирующих элементов в системе Ni–Al–Co обеспечивается повышение содержания в β -фазе основного упрочняющего компонента Co и значительное упрочнение β - и γ -фаз такими элементами, как Cr, Ti, Nb, Mo и Ta.

При исследовании структуры, фазового состава и механических свойств сплавов системы Ni–Al–Co на основе γ/γ' -фаз [27] при разработке новых жаропрочных деформируемых интерметаллидных сплавов выявлено, что в сплавах этой системы с объемным содержанием γ/γ' -фаз >90 % благодаря добавкам тантала и ниобия возможно обеспечить жаропрочность при температуре 900 °С на базе 100 ч при напряжении 100 МПа. При этом результаты проведенных исследований показали значительные потенциальные возможности композиций системы Ni–Al–Co, легированных танталом, титаном и ниобием, для создания интерметаллидных деформируемых жаропрочных сплавов нового класса для дисков турбин, работоспособных при температурах до 950 °С.

Следует отметить, что в работах [40–44] приведены основные закономерности создания конструкционных сплавов системы Ni–Al–Co методами направленной кристаллизации для получения сопловых лопаток газовых турбин. В этих исследованиях рассматривается вопрос влияния легирующих элементов на структуру и фазовый состав сплавов, полученных методом направленной кристаллизации, а также влияния легирования на жаростойкость композиций системы Ni–Al–Co при температуре 1200 °С.

Например, в работе [41] на основании анализа тройных диаграмм состояния системы Ni–Al–Co изучены особенности формирования структуры гетерофазных ($\beta + \gamma'$)-сплавов, в которых интерметаллид на основе Ni₃Al образуется по перитектической реакции. Установлено, что в сплавах данной системы с содержанием Co в количестве 8–10 % (атомн.) в условиях направленной кристаллизации при температуре 1370 °С формируется вырожденная эвтектика, а переход из ($\beta + \gamma$)- в ($\beta + \gamma' + \gamma$)-область происходит при температурах 1323–1334 °С. В работе [42] оценено влияние легирования на характер распределения кобальта и хрома в сплавах системы Ni–Al–Co. Показано, что дополнительное легирование усиливает различия в составе фаз по кобальту и хрому. Отмечена также высокая стабильность высокотемпературной

γ -фазы, формирующейся при кристаллизации по реакции $\beta \rightarrow \beta + \gamma$ и являющейся равновесной при температурах 1200 и 1300 °С.

В статье [43] представлено исследование жаростойкости на воздухе при температуре 1300 °С ($\beta + \gamma'$)-сплавов с содержанием: 28–29 % (атомн.) Al, 10 % (атомн.) Co, 0,25–0,4 % (атомн.) Re, изучено строение окарины и подокалинных слоев, образующихся при окислении в течение 2 и 100 ч в результате встречной диффузии алюминия и кислорода. Анализ результатов позволил установить положительное влияние на жаростойкость добавки 10 % (атомн.) Co при одновременном отсутствии такого легирующего элемента, как хром.

Как было указано ранее, для повышения технологической пластичности при деформационно-термической обработке сплавов используют методы, позволяющие получать полуфабрикаты с применением порошков или гранул. В связи с этим одним из альтернативных и перспективных технологических подходов получения сплавов системы Ni–Al–Co является технология металлургии гранул с последующей деформационно-термической обработкой скомпактированного материала. В работах [44, 45] обсуждаются альтернативные методы получения порошков-гранул в системе Ni–Al–Co, а также изготовление из них готовых полуфабрикатов с применением технологии металлургии гранул *as-HIP* без последующей деформационно-термической обработки. Например, в статье [44] показано, как с применением метода механического легирования исходных порошков никеля, алюминия и кобальта, а также путем гидридно-кальциевого восстановления оксидов металлов и распыления расплава системы Ni–Al–Co водой и инертным газом изготовлены партии порошков-гранул в данной системе легирования. По результатам проведенных исследований даны рекомендации по последующей обработке порошков-гранул в системе Ni–Al–Co при их получении методом механического легирования, путем гидридно-кальциевого восстановления оксидов металлов и распыления расплава водой и инертным газом в целях получения из них качественных формовок для последующего спекания и деформационно-термической обработки в системе Ni–Al–Co.

В работе [45] предложена альтернативная технология производства прутковых заготовок из сплава системы NiAl–Co–Cr–Hf–Al₂O₃, которая включает получение гранул сплава методом механохимического синтеза и его последующее горячее изостатическое прессование в формообразующей оснастке. Исследованы процессы механохимического синтеза интерметаллидного сплава в планетарной мельнице и атриторе, а также проведены сравнительные исследования продуктов синтеза, полученных в разных смесителях.

Таким образом, анализ научно-технических публикаций, посвященных разработке материалов системы Ni–Al–Co [28–37], показал, что в настоящее время возможно создавать на основе интерметаллидных матриц сплавы с повышенной пластичностью при комнатной температуре и высокой удельной прочностью при температурах до 950 °С.

Результаты и обсуждение

Следует отметить, что для разработки технологических подходов к получению конструкционных сплавов с высокими показателями удельной конструкционной прочности в системе Ni–Al–Co необходимо в первую очередь обосновать схему формирования конечного полуфабриката, которая удовлетворяла бы комплексу заданных характеристик. Так, например, одной из перспективных технологических схем получения полуфабрикатов в системе Ni–Al–Co с использованием подходов гранульной технологии, совмещенной с деформацией, может быть выбрана следующая:

- получение слитков заданного химического состава сплавов системы Ni–Al–Co с применением методов вакуумной индукционной плавки с последующим вакуумно-дуговым переплавом;
- получение гранул заданного химического состава методом газовой атомизации или путем плазменной плавки и центробежного распыления литой заготовки;
- физико-механическая обработка гранул с их последующей засыпкой в формообразующие капсулы и горячим изостатическим прессованием;
- термомеханическая и термическая обработки полученных таким образом монолитных образцов с применением экструдирования или штамповки конечного материала.

В свою очередь, при получении полуфабрикатов из сплавов системы Ni–Al–Co основной акцент необходимо сделать на их изготовление по оптимальной технологической схеме, которая заключается в применении термомеханической обработки полученных заготовок с помощью экструзии и горячей штамповки [46–50]. Особое внимание при проведении данных работ должно быть уделено разработке теоретических и экспериментальных моделей поведения материалов в системе Ni–Al–Co при сверхпластической деформации, которые могут дать детальную информацию по режимам поведения материалов данной системы при термомеханической обработке. Затем на основании полученных данных следует выбрать оптимальный состав сплава системы Ni–Al–Co, который обладал бы повышенными значениями прочности при комнатной температуре и вязкости разрушения, а также длительной прочностью при температуре 950 °С.

Разработанные научные подходы к созданию нового класса жаропрочных конструкционных сплавов системы Ni–Al–Co позволяют:

- сформировать научные основы для теоретического и практического освоения технологии получения подобного рода материалов с целью создания принципиально нового класса сплавов, обладающих высокой удельной конструкционной прочностью при температурах вплоть до 950 °С;
- получить данные о влиянии различных легирующих элементов на структуру и фазовый состав исследуемых сплавов в зависимости от технологии их получения, в результате исследования их структуры методами растровой электронной микроскопии и просвечивающей электронной микроскопии и оптимизировать составы сплавов как для технологии деформации слитка, так и для технологии металлургии гранул;
- на основании полученных теоретических моделей поведения подобного рода материалов при сверхпластической деформации разработать научные основы создания материалов в системе Ni–Al–Co с применением различных технологических подходов, включающих как традиционную технологию деформации слитка, так и технологию гранульной металлургии.

Заключения

Полученные результаты исследований могут быть использованы в качестве научного задела для разработки новых конструкционных сплавов на основе интерметаллидных матриц с повышенными характеристиками удельной конструкционной прочности вплоть до температуры 950 °С.

В свою очередь, результаты теоретических и экспериментальных моделей поведения подобного рода материалов при деформации позволят получить информацию о температурах максимального разупрочнения сплавов данного класса при разработке оптимальных режимов термомеханической обработки труднодеформируемых

интерметаллидных сплавов системы Ni–Al–Co с пониженной пластичностью при комнатной температуре.

Таким образом, высокотемпературная интерметаллидная матрица системы Ni–Al–Co является перспективной в качестве основы для создания нового класса жаропрочных конструкционных материалов современных ГТД.

В дальнейшей работе для решения рассматриваемой задачи необходимо разработать оптимальную схему получения полуфабрикатов из этих сплавов (поковки, прутки), а также провести комплекс исследований, направленных на выявление влияния легирующих элементов на структуру, фазовый состав и механические характеристики полученных сплавов.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей // Автоматическая сварка. 2013. № 10. С. 23–32.
2. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 19–36.
3. 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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Братухин А.Г., Шалин Р.Е., Каблов Е.Н., Толорайя В.Н., Орехов Н.Г. Литые монокристалльные турбинные лопатки // Литейное производство. 1993. № 6. С. 3–6.
5. Братухин А.Г., Каблов Е.Н., Толорайя В.Н. Сравнительный анализ материалов и технологических процессов получения монокристаллических турбинных лопаток // Авиационная промышленность. 1995. № 3. С. 20–31.
6. Каблов Е.Н. Основные направления развития материалов для авиакосмической техники XXI века // Перспективные материалы. 2000. № 3. С. 27–36.
7. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Петрушин Н.В. Никелевые жаропрочные сплавы для литья лопаток с направленной и монокристаллической структурой (Часть II) // Материаловедение. 1997. № 5. С. 14–17.
8. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Петрушин Н.В. Никелевые жаропрочные сплавы для литья лопаток с направленной и монокристаллической структурой (Часть I) // Материаловедение. 1997. № 4. С. 32–39.
9. Каблов Е.Н. Пути повышения жаропрочности никелевых сплавов // Metallurg. 2000. № 4. С. 26–28.
10. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Литейные жаропрочные никелевые сплавы для перспективных авиационных ГТД // Технология легких сплавов. 2007. № 2. С. 6–16.
11. 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.
12. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 36–52.
13. Корнилов И.И. Физико-химические основы жаропрочности сплавов М.: Изд-во АН СССР, 1961. 561 с.
14. Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Елютин Е.С. Рений в монокристаллических жаропрочных никелевых сплавах для лопаток газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2014. № S5. С. 5–16. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-S5-5-16.
15. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.

16. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
17. Кишкин С.Т. Создание, исследование и применение жаропрочных сплавов. М.: Наука, 2006. 408 с.
18. Каблов Е.Н., Бронфин М.Б. Эффект С.Т. Кишкина, или почему структура жаропрочных сплавов должна быть гетерофазной // Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина: К 100-летию со дня рождения С.Т. Кишкина: науч.-техн. сб. М.: Наука, 2006. 272 с.
19. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высоконагруженных деталей газотурбинных двигателей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. № SP2. С. 13–19.
20. История авиационного материаловедения. ВИАМ-80 лет: годы и люди / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012. 520 с.
21. Каблов Е.Н., Толорайя В.Н. ВИАМ – основоположник отечественной технологии литья монокристаллических турбинных лопаток ГТД и ГТУ // Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 105–117.
22. Галиева Э.В., Поварова К.Б., Дроздов А.А., Валитов В.А. Строение и свойства твердофазных соединений деформируемого никелевого сплава ЭП975 и монокристаллического интерметаллидного сплава ВКНА-25, полученных сваркой давлением со степенью деформации 24 % в условиях сверхпластичности сплава ЭП975 // Металлы. 2018. № 6. С. 64–72.
23. Гарибов Г.С. Научно-технический задел в области гранульной металлургии для создания перспективных авиационных двигателей // Технология легких сплавов. 2018. № 2. С. 63–71.
24. Гессингер Г.Х. Порошковая металлургия жаропрочных сплавов. Челябинск: Металлургия, Челябинск. отд-е, 1988. 320 с.
25. Гарибов Г.С. В.И. Добаткин и металлургия гранул жаропрочных никелевых сплавов // Технология легких сплавов. 2015. № 2. С. 34–39.
26. Гарибов Г.С. Теория кристаллизации и технология гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов // Технология легких сплавов. 2016. № 1. С. 107–118.
27. 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: 05.07.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2013-0-10-1-1.
28. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б. Развитие технологии направленной кристаллизации литейных высокожаропрочных сплавов с переменным управляемым температурным градиентом // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 24–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-24-38.
29. Kablov E.N., Petrushin N.V., Sidorov V.V. Rhenium in Nickel-Base Superalloys for Single Crystal gas turbine blades // 7th International Symposium on Technetium and Rhenium – Science and Utilization book of proceedings. 2011. С. 17.
30. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е. Производство литых прутковых (шихтовых) заготовок из современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов // Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР: труды Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 310-летию Уральской металлургии. Екатеринбург, 2011. С. 31–38.
31. Кучеряев В.В., Миронова Н.А., Шишков С.Ю. Исследование технологических особенностей деформирования слитков из сплава системы Ni–Al–Co // Труды ВИАМ. 2016. № 3 (39). Ст. 01. URL: <http://www.viam.works.ru> (дата обращения: 05.07.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-1-1.
32. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Летников М.Н., Мазалов И.С. Применение новых деформируемых никелевых сплавов для перспективных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 116–129. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-116-129.
33. Поварова К.Б., Казанская Н.К., Ломберг Б.С., Бондаренко Ю.А., Школьников Д.Ю. Конструкционные жаропрочные ($\beta + \gamma$)-сплавы на основе NiAl с повышенной низкотемпературной пластичностью // Металлург. 1996. № 5. С. 13–20.

34. Банных О.А., Поварова К.Б. Интерметаллиды – новый класс легких жаропрочных и жаростойких материалов // *Технология легких сплавов*. 1992. № 5. С. 26–32.
35. Поварова К.Б., Ломберг Б.С., Филин С.А., Казанская Н.К., Школьников Д.Ю., Беспалова М.Д. Структура и свойства ($\beta + \gamma$)-сплавов системы Ni–Al–Co // *Металлы*. 1994. № 3. С. 77.
36. Поварова К.Б., Казанская Н.К., Ломберг Б.С., Школьников Д.Ю., Филин С.А., Беспалова М.Д. Фазовый состав и структура сплавов на основе NiAl систем Ni–Al–Co–Me, где Me – Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo // *Металлы*. 1996. № 3. С. 33.
37. Поварова К.Б., Ломберг Б.С., Казанская Н.К., Дроздов А.А. Принципы создания конструкционных сплавов на основе NiAl для высокотемпературной службы // *Проблемы создания новых материалов для авиакосмической отрасли в XXI веке: тез. докладов межотраслевой науч.-практ. конф. (Москва, 25–26 июня 2002 г.)*. М.: ВИАМ, 2002. С. 32.
38. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // *Вестник РФФИ*. 2017. № 3. С. 97–105.
39. Летников М.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г., Бакрадзе М.М. Влияние скорости охлаждения при закалке на микроструктуру и свойства жаропрочного деформируемого никелевого сплава ВЖ175-ИД // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 2 (55). С. 21–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-21-30.
40. Базылева О.А., Оспенникова О.Г., Аргинбаева Э.Г., Летникова Е.Ю., Шестаков А.В. Тенденции развития интерметаллидных сплавов на основе никеля // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S (84). С. 104–115. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-104-115.
41. Поварова К.Б., Дроздов А.А., Базылева О.А., Морозов А.Е., Антонова А.В., Бондаренко Ю.А., Булахтина М.А., Ашмарин А.А., Аргинбаева Э.Г., Аладьев Н.А. Конструкционные жаростойкие (NiAl + Ni₃Al) сплавы системы Ni–Al–Co. I. Особенности кристаллизации и структуры сплавов // *Металлы*. 2017. № 5. С. 20–30.
42. Поварова К.Б., Дроздов А.А., Базылева О.А., Морозов А.Е., Антонова А.В., Бондаренко Ю.А., Булахтина М.А., Аргинбаева Э.Г., Амежнов А.В. Влияние концентрации кобальта и легирования хромом на строение тепло, жаростойких (NiAl + Ni₃Al + Ni) сплавов системы Ni–Al–Co // *Металлы*. 2018. № 4. С. 50–55.
43. Поварова К.Б., Дроздов А.А., Базылева О.А., Морозов А.Е., Антонова А.В., Аргинбаева Э.Г., Аладьев Н.А., Сиротинкин В.П. Конструкционные жаростойкие (NiAl + Ni₃Al) сплавы системы Ni–Al–Co. II. Окисление // *Металлы*. 2017. № 5. С. 31–36.
44. Поварова К.Б., Скачков О.А., Дроздов А.А. и др. Порошковые сплавы Fe–Cr–Al и NiAl. I. Получение порошков // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2017. Т. 15. № 8. С. 13–20.
45. Логачева А.И., Гусаков М.С., Сентюрин Ж.А. и др. Изготовление прутковых заготовок на основе NiAl для плазменного центробежного распыления с применением метода механохимического синтеза // *Металлы*. 2017. № 3. С. 84–93.
46. Разуваев Е.И., Капитаненко Д.В., Сидоров С.А. Влияние структуры и температурно-скоростных параметров при горячей деформации сплава ЭП742 (ХН62БМКТЮ) // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2019. № 2. С. 22–30.
47. Изаков И.А., Капитаненко Д.В., Сидоров С.А., Чеботарева Е.С. Нагревательные установки для изотермического деформирования. Часть 1. Типы установок // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2019. № 3. С. 23–32.
48. Изаков И.А., Капитаненко Д.В., Бубнов М.В., Баженов А.Р. Исследование параметров технологических процессов изотермического деформирования // *Новости материаловедения. Наука и техника*. 2016. № 5 (23). С. 4.
49. Изаков И.А., Капитаненко Д.В., Бубнов М.В., Некрасов Б.Р. Термомеханические основы изотермического деформирования металлов в условиях динамического разупрочнения // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2015. № 8. С. 38–45.
50. Разуваев Е.И., Моисеев Н.В., Капитаненко Д.В., Скугорев А.В. Современные технологии обработки металлов давлением // *Технология легких сплавов*. 2015. № 1. С. 37–43.