

УДК 669.018.44:669.245

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s5-17-22

Л.И. Рассохина¹, О.Н. Битюцкая¹, А.Р. Нарский¹**РАЗРАБОТКА ОПЫТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ОТЛИВОК ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ВЖЛ21**

Разработана опытная технология литья лопаток из нового жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ21. Выбрана и исследована конструкция оптимальной литниково-питающей системы. Проведен экспериментальный выбор состава керамической формы.

Определены оптимальные параметры литья по выплавляемым моделям лопаток для газотурбинного двигателя наземного применения НК-36СТ: температуры керамической формы, перегрева и заливки сплава. Проведены исследования зависимости состояния макро- и микроструктуры от технологических параметров литья и состава керамической формы отливки неохлаждаемой лопатки. Выполнены исследования отливки лопаток опытной партии методами неразрушающего контроля на наличие металлургических дефектов. Исследованы макро- и микроструктуры материала отливок лопаток опытной партии.

Ключевые слова: жаропрочные сплавы, литье по выплавляемым моделям, керамическая форма, лопатка, макроструктура, микроструктура.

An experimental technology for casting of blades from new nickel-based superalloy (VZHL21) was developed. Design of feeding gate system was selected and researched. The mold composition was chosen on the base of experiments.

Some optimal parameters of investment casting of blades for terrestrial gas-turbine engine NK-36ST were determined: temperature of the ceramic mold, temperatures of alloy overheat and pouring. An influence of processing conditions of casting and ceramic mold composition on macro- and microstructure was studied. Researches of an experimental batch of casting blades were performed by nondestructive methods (NDT methods) to detect metallurgical defects. Macrostructure and microstructure of cast blades of an experimental batch were investigated.

Keywords: superalloys, investment casting, ceramic mold, blade, macrostructure, microstructure.

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

Научно-исследовательская работа по оптимизации технологии литья деталей из жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ21 проводилась во ФГУП «ВИАМ» совместно с ФГБОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королева». Цель работы заключалась в повышении надежности нового двигателя (модификации двигателя НК-36СТ) с возможностью его форсирования благодаря созданию перспективных жаропрочных сплавов и инновационных технологий их производства для деталей по номенклатуре ОАО «Кузнецов».

Известно, что важнейшим фактором развития современных газотурбинных двигателей (ГТД) и стационарных газотурбинных энергетических установок (ГТУ) является создание новых конструкционных материалов с улучшенным комплексом свойств [1, 2]. Эксплуатационные характеристики авиационных ГТД и ГТУ определяются главным образом работоспособностью материалов, применяемых для изготовления деталей горячего тракта [3, 4]. Наиболее ответственными деталями ГТД и ГТУ являются рабочие и сопловые лопатки из никелевых жаропрочных сплавов,

определяющие максимальную температуру рабочего газа на входе в турбину, удельную мощность, экономичность и ресурс двигателей [5, 6].

ВИАМ – это организация, которой, в частности, принадлежит ведущая роль в области разработки литейных жаропрочных сплавов для изготовления турбинных и сопловых лопаток ГТД и ГТУ [7–10].

Методика проведения исследований

Первоочередной задачей авиационного двигателя является повышение коэффициента полезного действия (КПД) и ресурса работы двигателя, которая решается путем увеличения рабочих температур и снижения массы теплонагруженных деталей двигателя. Известны и другие материаловедческие и конструкторские пути решения этой проблемы – создание новых жаропрочных сплавов и разработка технологий литья из них деталей. Термоциклирование, высокотемпературные и знакопеременные нагрузки интенсифицируют диффузионные и усталостные процессы, которые приводят к деградации структуры и, следовательно, к снижению жаропрочности, пластичности и вязкости разрушения деталей, к

которым относятся рабочие и сопловые лопатки двигателя из сплавов с поликристаллической структурой. В настоящее время в отечественном двигателестроении при изготовлении сопловых и рабочих лопаток наиболее широко используется жаропрочный никелевый сплав ЖС6У (удельная длительная прочность $41,57 \text{ МПа} \cdot \text{см}^3/\text{г}$), который по характеристикам удельной жаропрочности при температурах 900 и 1000°C уже не удовлетворяет поставленным задачам при создании перспективного двигателя с высоким КПД [9].

В связи с этим возникла необходимость в разработке жаропрочного сплава для литья деталей с поликристаллической структурой, низкой плотностью и повышенными характеристиками длительной прочности. Такими свойствами обладает разработанный в ВИАМ жаропрочный никелевый сплав ВЖЛ21 (плотность $8,19 \text{ г/см}^3$) с удельной длительной прочностью $42,75 \text{ МПа} \cdot \text{см}^3/\text{г}$.

Поиск композиции этого сплава проводился с помощью метода компьютерного конструирования [11] на основе расчетов фазового состава, температур солвус γ' , солидус и ликвидус и параметров фазовой стабильности жаропрочного никелевого сплава. По литейным технологическим свойствам сплав не уступает вышеуказанным серийным отечественным сплавам с равноосной структурой.

Материалы и методы

Научно-исследовательская работа включала в себя следующие этапы:

- оптимизация конструкции литниково-питающей системы;
- экспериментальный выбор состава керамической формы;
- оптимизация технологических режимов нагрева керамической формы, расплава и температуры заливки;
- исследование зависимости состояния макро- и микроструктуры от технологических параметров литья и состава керамической формы отливки неохлаждаемой лопатки;
- проведение исследований отливок лопаток опытной партии методами неразрушающего контроля на наличие металлургических дефектов;
- исследование макро- и микроструктуры материала отливок лопаток опытной партии.

Результаты

Для проведения исследовательских работ выплавлена шихтовая прутковая заготовка из сплава ВЖМ21, проведен контроль химического состава на содержание вредных примесей и газов в соответствии с ТУ 1-595-1-1343–2012.

При разработке конструкций литниково-питающих систем требовалось выполнение ряда условий, обеспечивающих:

- плавное заполнение полости литейной формы и питание отливок в процессе кристаллизации металла;

- одинаковые условия заполнения полостей отливок металлом, охлаждения и кристаллизации металла для каждой отливки в блоке;

- отсутствие металлургических дефектов на отлитых лопатках, связанных с заливкой металла;
- коэффициент использования металла литниково-питающей системой в пределах 0,3–0,4.

Исходя из практического опыта литья лопаток длиной до 200–250 мм и массой литой заготовки до 2 кг, оптимальной является литниковая система с подводом металла в торец замка со стороны входной кромки. Учитывая особенности конструкции отливки неохлаждаемой лопатки: общая длина 260 мм, межполочное расстояние 180 мм, толщина входной кромки пера лопатки 2,1 мм, толщина выходной кромки пера 1,6 мм (восковая модель получена от СГАУ им. С.П. Королева), для заливки данной лопатки предложено два варианта комбинированной литниковой системы.

Выбор состава керамической формы

Метод литья по выплавляемым моделям позволяет получать точные сложнопрофильные лопатки ГТД и ГТУ с необходимыми свойствами и конфигурацией без механической обработки по перу. При этом качество литых деталей во многом определяет керамическая форма, которая должна обеспечить не только точность воспроизводимых геометрических размеров, но и снизить риск возникновения металлургических дефектов и горячих трещин в отливке лопатки.

Для получения оболочковой формы и дальнейшей отливки неохлаждаемой лопатки было предложено использовать керамическую суспензию на основе гидролизованного раствора этилсиликата ЭТС-40, порошков керамической шихты электрокорунда и дистен-силлиманитового концентрата. Один из вариантов состава формы содержал дистен-силлиманитовый концентрат, а другой – нет.

Экспериментально проведен подбор температур нагрева керамической формы, высокотемпературной обработки расплава (перегрева) и температур заливки, обеспечивших формирование отливки неохлаждаемой лопатки. При подборе основывались на следующих паспортных данных сплава ВЖЛ21 в литом состоянии по температурам фазовых превращений:

- 1250°C – полного растворения упрочняющей γ' -фазы;
- 1270°C – начального плавления эвтектики ($\gamma + \gamma'$);
- 1345°C – ликвидус (нагрев).

Исследования позволили выбрать технологический режим литья отливки неохлаждаемой лопатки: $T_{\text{формы}} = 1000 \pm 60^\circ\text{C}$, $T_{\text{перегрева}} = 1600 \pm 60^\circ\text{C}$, $T_{\text{заливки}} = 1500 \pm 60^\circ\text{C}$.

По этому режиму проведена заливка керамических форм (в двух вариантах литниково-питающей системы) и затем визуально оценено качество литья (отсутствие незаливов, пор и других литейных дефектов). Это позволило выбрать

оптимальную схему литниково-питающей системы.

После удаления остатков керамической формы и элементов литниково-питающей системы проведено исследование макроструктуры материала отливок: на пере отливки лопатки имелись ярко выраженные границы перехода крупного зерна в мелкое, размер макрозерна составил от 0,5 до 3 мм.

С помощью растрового электронного микроскопа JSM-840 исследована микроструктура фрагментов пера отливки лопатки в двух сечениях (входная и выходная кромка).

Микроструктура исследованных фрагментов является характерной для никелевого жаропрочного сплава равноосной кристаллизации в литом состоянии. Она представляет собой γ -твердый раствор, упрочненный частицами γ' -фазы, имеет место размерная неоднородность частиц упрочняющей γ' -фазы в осях дендритов и межосных участках, в междендритных областях расположены эвтектика (γ - γ') и выделения карбидов. Карбиды располагаются как в теле зерна, так и по границам зерен; границы зерен оторочены карбидными частицами и частицами γ' -фазы.

Микроструктура входной кромки пера отливки неохлаждаемой лопатки приведена на рис. 1.

В результате анализа макро- и микроструктуры, изготовления опытной партии отливок, исследований по оценке качества литья выбран состав керамической формы с электрокорундом и дистен-силлиманитовым концентратом.

Изготовление керамической формы

Изготовлены керамические формы с выбранным вариантом расположения и количества лопаток (рис. 2).

По выбранному оптимальному режиму литья произведена заливка опытной партии лопаток.

Исследование отливок лопаток опытной партии методами неразрушающего контроля на наличие металлургических дефектов

После отрезки отливок лопаток от литниково-питающей системы и обдува от остатков керамической формы опытная партия отливок лопаток исследована на качество литья. После визуального контроля на первой отливке лопатки (условный номер 3) в зоне радиуса перехода выявлен металлургический дефект «керамический засор», связанный с качеством изготовления керамической формы.

После проведения визуального контроля партия отливок лопаток прошла неразрушающий контроль радиографическим методом. При расшифровке рентгенограмм на отливках лопаток выявлены следующие металлографические дефекты (условные номера 1, 3, 4, 5):

Отливка 1. Перо – одиночные поры диаметром от 0,5 до 0,6 мм (8 шт.); рыхлоты размером 1,0×1,0; 2,5×0,5; 0,4×0,5; 4,5×1,5 и 4,5×1,5 мм; замок – пора размером 0,6 мм; рыхлоты размером 6,0×0,9 и 3,5×0,7 мм.

Отливка 2. Перо – одиночные поры диаметром 0,4 (4 шт.) и 0,5 мм (2 шт.); рыхлоты размером 1,2×1,2; 4,0×0,8; 3,5×1,5 и 8,0×5,0 мм; замок – рыхлота размером 8,0×6,0 мм.

Отливка 3. Перо – одиночные поры диаметром 0,5–0,6 и 0,3 мм (2 шт.); рыхлоты размером 1,0×0,5; 0,6×0,6; 2,0×1,5 и 2,0×0,9 мм; замок – рыхлота размером 7,0×5,0 мм.

Отливка 4. Перо – одиночная пора диаметром 0,4 мм; рыхлоты размером 3,0×0,5; 2,5×1,0; 4,0×0,6; 6,0×2,5; 5,0×0,8; 5,0×1,5; 5,5×1,0; 3,5×0,5 и 2,0×0,5 мм; замок – рыхлота размером 3,5×0,6 мм.

Отливка 5. Перо – одиночная пора диаметром 0,4 и 0,5 мм; усадочные раковины размером 1,8×1,3; 2,5×1,0; 3,0×0,5 и 4,0×0,5 мм; замок – рыхлота размером 14,5×3,0 мм.

Проведен неразрушающий контроль [12–15] капиллярным методом (ЛЮМ 33-ОВ) поверхностей отливок лопаток. По его результатам выявлено следующее.

Отливка 1. На пере лопатки (со стороны корыта), а также на замках выявлено яркое множественное свечение от несплошностей типа пор и рыхлот.

Отливка 2. На пере лопатки (со стороны корыта и спинки) выявлены несплошности в виде единичных пор диаметром от 0,5 до 1 мм. На переходе от пера к замку (со стороны корыта) выявлено свечение от скопления пор диаметром от 0,5 до 1,5 мм.

Отливка 3. На поверхности пера (со стороны спинки) выявлены следы от единичных пор. По центру пера выявлена рыхлота диаметром 3 мм. На корыте выявлены единичные поры диаметром от 0,5 до 1,5 мм; в радиусе перехода пера в замок обнаружена рыхлота до 3 мм.

Отливка 4. По центру пера (со стороны спинки) выявлено две несплошности с шириной раскрытия <1 мкм и протяженностью 5 мм, на входной кромке пера выявлена несплошность с шириной раскрытия <1 мкм и протяженностью 1,5 мм. В радиусе перехода пера лопатки в бандажную полку выявлено скопление единичных пор диаметром <1 мм.

Отливка 5. На пере лопатки (со стороны спинки) выявлена рыхлота диаметром 3 мм, единичные поры диаметром от 1 до 1,5 мм. На замке (со стороны спинки) выявлена несплошность с шириной раскрытия <1 мкм и протяженностью 5 мм. На входной кромке пера отливки лопатки выявлены две несплошности с шириной раскрытия от 0,5 до 1,5 мм и протяженностью до 3 мм.

Исследование макроструктуры материала отливок лопаток опытной партии

После визуального и неразрушающего контроля радиографическим и капиллярным методами лопаток опытной партии проведено исследование макроструктуры материала отливки. Установлено, что макроструктура материала отливки ло-

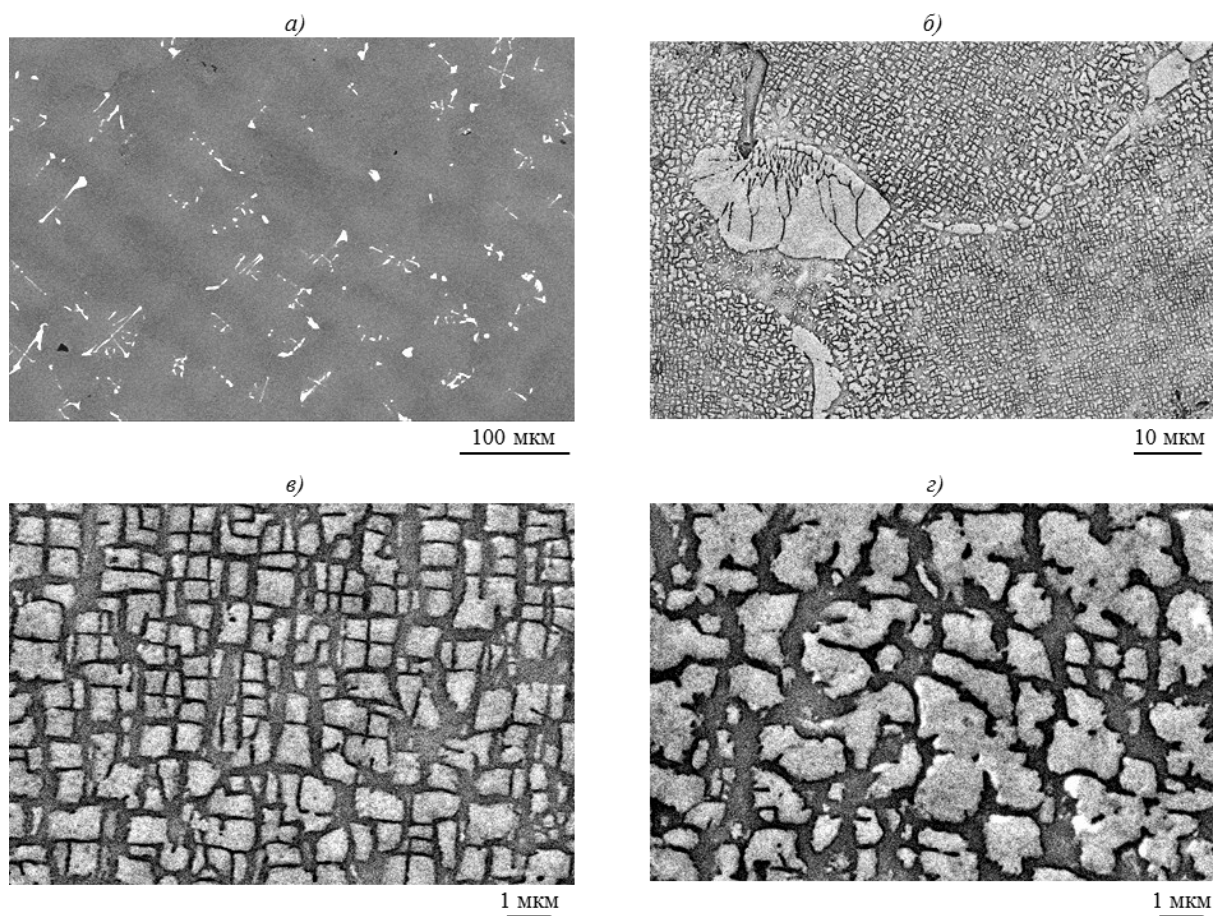


Рис. 1. Микроструктура входной кромки пера отливки неохлаждаемой лопатки: *a* – общий вид; *б* – карбидная и эвтектическая фазы; *в* – упрочняющая γ' -фаза в осях дендритов; *г* – упрочняющая γ' -фаза в межосных участках

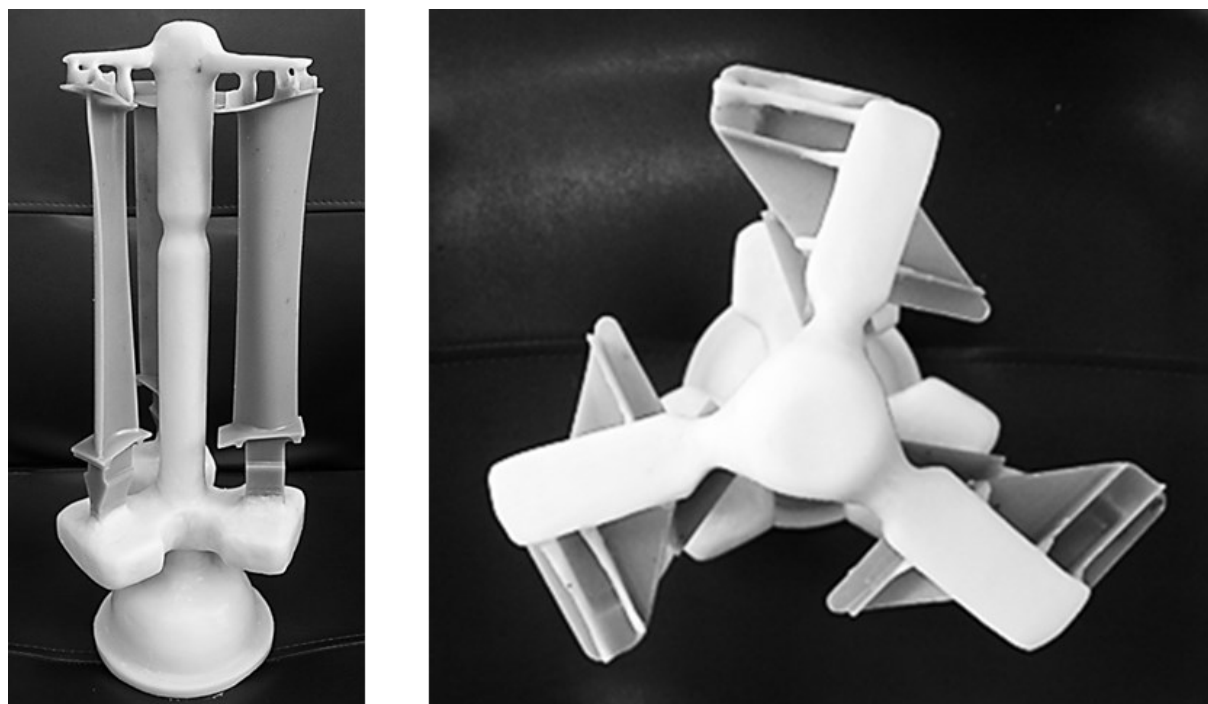


Рис. 2. Модельный блок лопаток

патки неоднородная, на пере отливки лопатки обозначены ярко выраженные границы перехода крупного зерна в мелкое. Определен размер макрозерна, который составил от 0,5 до 3 мм.

***Исследование микроструктуры материала
отливок лопаток опытной партии
в литом состоянии***

При исследовании микроструктуры отливки лопатки 4 опытной партии с помощью растрового электронного микроскопа JSM-840 изучена микроструктура фрагментов отливки лопатки на микрошлифах, вырезанных из замка и пера (входная и выходная кромки) в поперечном сечении.

Микроструктуру изучали на шлифах после травления в режимах вторичных и отраженных электронов.

Наиболее часто для получения изображения используют сигнал вторичных электронов (secondary electron image – SEI). Вторичные электроны позволяют получать разрешение лучше (<10 нм), чем в случае отраженных электронов.

Когда необходимо получить информацию об элементном составе и распределении фаз, то используют специальный режим COMPO, контраст изображения в котором формируется отраженными электронами (backscattered electron image – BEI). Фазы на основе элементов с небольшой атомной массой имеют вид темных образований, а на основе элементов с большей атомной массой – светлых частиц.

Поэтому при исследовании образцов в режиме отраженных электронов COMPO (BEC) хорошо видны дендритная структура материала лопатки (вследствие разного химического состава осей и межосных участков), яркие белые частицы карбидов, а также черные литейные поры.

Исследование образцов в режиме вторичных электронов показало, что микроструктура материала лопатки во всех сечениях является характерной для никелевого жаропрочного сплава ВЖЛ21 равноосной кристаллизации в литом состоянии: она представляет собой γ -твердый раствор, упрочненный частицами γ' -фазы, имеет место разная степень дисперсности частиц упрочняющей γ' -фазы в осях дендритов и межосных участках, что является следствием дендритной ликвации.

В междендритных областях расположены эвтектика (γ - γ') и выделения карбидов. Карбиды располагаются как в теле зерна, так и по границам зерен, границы зерен оторочены карбидными частицами и частицами γ' -фазы. В междендритных областях вокруг глобул первичной γ' -фазы наблюдаются зоны с дисперсными выделениями частиц γ' -фазы.

Обсуждение и заключения

В результате работы:

- проведены вакуумная выплавка и аттестация партии шихтовых прутковых заготовок из сплава ВЖЛ21 на соответствие техническим условиям на сплав;

- проведены опытно-технологические исследования технологии литья отливки неохлаждаемой лопатки из шихтовой прутковой заготовки сплава ВЖЛ21:

- выбрана конструкция литниково-питающей системы;

- выбран и опробован экспериментальный режим заливки керамической формы неохлаждаемой лопатки: $T_{\text{формы}}=1000\pm 60^\circ\text{C}$, $T_{\text{перегрева}}=1600\pm 60^\circ\text{C}$, $T_{\text{заливки}}=1500\pm 60^\circ\text{C}$;

- исследована макроструктура отливки неохлаждаемой лопатки;

- исследована микроструктура фрагментов неохлаждаемой лопатки в литом состоянии.

На основе проведенных исследований по выбранному оптимальному режиму изготовлена опытная партия отливок и проведены исследования отлитых лопаток методами неразрушающего контроля (радиографический и капиллярный) на наличие металлургических дефектов. Исследованы макро- и микроструктуры материала отливок лопаток в литом состоянии.

Благодарности

Авторы выражают благодарность за содействие сотрудникам ФГБОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королева»: д.т.н., профессору, декану факультета «Двигатели летательных аппаратов» А.И. Ермакову и к.т.н., заведующему лабораторией аддитивных технологий В.Г. Смелову.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. 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.
3. Герасимов В.В., Демонис И.М. Формирование композиционной структуры в эвтектических сплавах при получении лопаток ГТД //Труды ВИАМ. 2013. №6. Ст. 01 (viam-works.ru).
4. Каблов Е.Н., Толорайя В.Н. ВИАМ – основоположник отечественной технологии литья монокристаллических турбинных лопаток ГТД и ГТУ //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 105–117.
5. 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.

6. Бондаренко Ю.А., Каблов Е.Н. Направленная кристаллизация жаропрочных сплавов с повышенным температурным градиентом //МиТОМ. 2002. №7. С. 20–23.
7. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Ригин В.Е., Горюнов А.В. Современные технологии получения прутковых заготовок из литейных жаропрочных сплавов нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 97–105.
8. Толорайя В.Н., Алешин И.Н., Остроухова Г.А. Литье сопловых лопаток методом высокоградиентной направленной кристаллизации //Литейное производство. 2012. №6. С. 17–20.
9. Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Рассохина Л.И., Битюцкая О.Н. Литейный жаропрочный сплав нового поколения ВЖЛ21 с поликристаллической структурой //Литейщик России. 2014. №6. С. 40–46.
10. 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.
11. Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Висик Е.М., Рассохина Л.И., Тимофеева О.Б. Жаропрочные никелевые сплавы низкой плотности //Литейное производство. 2012. №6. С. 5–11.
12. Степанов А.В., Косарина Е.И., Саввина Н.А., Усачев В.Е. Макро- и микропористость в сплавах на основе алюминия и никеля, обнаружение ее рентгеноскопическими методами неразрушающего контроля //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 423–430.
13. Степанов А.В. Методы рентгеновского неразрушающего контроля в производстве авиационных двигателей //Авиационные материалы и технологии. 2010. №3. С. 28–32.
14. Степанов А.В., Косарина Е.И., Евтюхова О.С., Михайлова Н.А. Алгоритм разработки технологических карт радиографического контроля в соответствии с европейскими нормами //Контроль. Диагностика. 2013. №2. С. 27–33.
15. Степанов А.В., Ложкова Д.С., Косарина Е.И. Компьютерная радиография: результаты практических исследований и возможность замены пленочных технологий //Вестник Московского энергетического института. 2011. №3. С. 57–62.