

УДК 669.018.44:669.245

О.Г. Оспенникова¹**ТЕНДЕНЦИИ СОЗДАНИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ С ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ И МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ (обзор)**

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-3-19

Проведен анализ научно-технического развития в области разработки и использования литейных жаропрочных никелевых сплавов со специальными свойствами, сложившихся мировых тенденций. Сравнительный анализ отечественного и зарубежного опыта создания жаропрочных никелевых сплавов для лопаток ГТД и тенденций развития разработок в данной области материаловедения показывает, что применение отечественных жаропрочных сплавов и технологий нового поколения позволит создать российские конкурентоспособные двигатели, превосходящие по всем техническим и экономическим характеристикам двигатели зарубежного производства. В результате проведенного анализа систем легирования жаропрочных никелевых сплавов с монокристаллической и поликристаллической структурами для создания литейных жаропрочных никелевых сплавов с низкой плотностью предложены направления повышения уровня их основных характеристик.

Ключевые слова: металлургия, монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы, направленная структура, материаловедение, кристаллизация, редкоземельные элементы.

There is given an analysis of scientific and technical development in the field of development and application of cast heat-resistant nickel alloys of low density with the special properties, the existing world tendencies. The comparative analysis of domestic and foreign experience of creation of heat-resistant nickel alloys for blades of gas turbine engines and progress trends of developments in the field of materials science shows that application of domestic heat-resistant alloys and technologies of new generation will allow to create the Russian competitive engines, which are superior to engines of foreign production in all technical and economic characteristics. The carried out analysis of systems of alloying of heat-resistant nickel alloys with single-crystal and polycrystalline structures for creation of cast heat-resistant nickel alloys with low density, resulted in the opportunity to select general directions in the field of increasing the level of the main characteristics of heat-resistant cast alloys.

Keywords: metallurgy, single-crystal heat-resistant nickel alloys, directional structure, materials science, crystallization, rare-earth elements.

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

Анализ зарубежных публикаций, а также общие тенденции развития материаловедения показывают, что в настоящее время интенсивно ведутся разработки и исследования в области литейных жаропрочных сплавов со специальными свойствами, сырья, исходных компонентов для их производства и технологий их переработки в высокотехнологичную наукоемкую продукцию с большой долей инновационной составляющей. Такие разработки в области жаропрочных сплавов и сталей проводят фирмы США, Японии, ЕС, Китая, Индии, Юго-Восточной Азии, Южной Америки, ориентирующиеся на переход от исследовательских работ к коммерческому их использованию.

В настоящее время в промышленности для литья рабочих и сопловых лопаток ГТД широко используются литейные жаропрочные никелевые сплавы низкой плотности с равноосной структурой, такие как ВЖЛ12У (плотность $d=7,93 \text{ г/см}^3$,

длительная прочность $\sigma_{100}^{1000}=140 \text{ МПа}$) и ЖС6У ($d=8,4 \text{ г/см}^3$, $\sigma_{100}^{1000}=170 \text{ МПа}$). Однако по своим характеристикам жаропрочности они не удовлетворяют современным требованиям [1–10].

Дальнейшее повышение жаропрочности было достигнуто благодаря применению в газовой турбине монокристаллических лопаток из жаропрочных никелевых сплавов нового поколения. Основное преимущество монокристаллических лопаток по сравнению с традиционными поликристаллическими заключается в значительно более высоком сопротивлении высокотемпературной ползучести и термической усталости, что обусловлено отсутствием в монокристаллических лопатках границ зерен.

В настоящее время можно выделить два направления в разработке монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) для производства турбинных лопаток перспективных

авиационных двигателей. К первому направлению относятся ЖНС, содержащие тугоплавкие переходные металлы Mo, W, Ta, Re и Ru в количестве, ограниченном только их предельной суммарной растворимостью в γ -твердом растворе и равновесной с ним γ' -фазе. В результате, в соответствии с международной классификацией, разработаны ЖНС нескольких поколений для литья монокристаллических лопаток авиационных двигателей:

- сплавы первого поколения содержат традиционные легирующие элементы (ЛЭ), такие как Al, Ti, Cr, Mo, W, Ta, Nb и Hf;

- в сплавы второго и третьего поколений вводят Re в количестве 2–4% и 5–6% соответственно;

- сплавы четвертого и пятого поколений – ренийсодержащие ЖНС, дополнительно легированные Ru [1–21].

Типичные представители сплавов этого класса – известные зарубежные монокристаллические сплавы марок EPM-102/MX-4/PWA-1497 (компании GE, Pratt & Whitney and NASA, США), TMS-162, TMS-196 (компании NIMS and IHI, Япония) и отечественные ВЖМ4 и ВЖМ6, которые имеют наибольшую длительную прочность и температурную работоспособность. При этом увеличение жаропрочности сплавов сопровождалось существенным повышением их плотности [14, 16–22]. Поэтому во многих исследовательских центрах работают над созданием монокристаллических жаропрочных сплавов со значительно более низкой плотностью (по сравнению с ЖНС второго-пятого поколений). Так, фирмой MTU (Германия) разработан монокристаллический ЖНС марки LEK94 в качестве материала для лопаток ротора турбин среднего давления на двигателе TP400-D6 для европейского самолета A400M. Среди других достижений следует отметить монокристаллические ЖНС серии LDS (NASA, США) [23–25].

Во ФГУП «ВИАМ» разработан метод расчета длительной прочности монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов. Подход основан на расчете физико-химических и структурных параметров, определяющих жаропрочность гетерофазных никелевых сплавов, по аналитическим моделям. Сформулированы основные принципы сбалансированного легирования монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов [26–28].

Установлен фундаментальный факт существенной зависимости длительной прочности (макроскопическая характеристика) монокристаллов от величины и знака несоответствия периодов кристаллических решеток γ - и γ' -фаз (микроскопический показатель).

Разработан метод компьютерного конструирования литейных жаропрочных никелевых сплавов, включающий расчеты фазового состава, параметров фазовой стабильности, физико-химических, структурно-фазовых, теплофизических и жаропрочных характеристик, который поз-

воляет на основе расчетов сбалансированного легирования обеспечить заданные значения физико-механических характеристик жаропрочных сплавов, включая их фазовую стабильность [26–28]. Методом компьютерного конструирования разработаны высокожаропрочные монокристаллические сплавы третьего и четвертого поколений, легированные рением и рутением, такие как ВЖМ1, ВЖМ2, ВЖМ4 [19, 26].

В результате успешного завершения серии исследований [11–16] во ФГУП «ВИАМ» разработаны монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы марок ВЖЛ20 ($d=8,04$ г/см³, $\sigma_{1000}^{1000}=190$ МПа), ЖС36 ($d=8,724$ г/см³, $\sigma_{1000}^{1000}=250$ МПа) и ВЖМ4 ($d=8,87$ г/см³, $\sigma_{1000}^{1000}=305$ МПа). Применение жаропрочного сплава ВЖЛ20 для производства лопаток турбин перспективных двигателей сдерживается из-за недостаточно высокой рабочей температуры сплава (1000°C). Сплав ЖС36, содержащий 2% рения, в настоящее время применяется для производства монокристаллических рабочих лопаток первой ступени турбины авиационных двигателей ПС-90 и ПС-90А2. Однако использовать этот сплав для литья рабочих и сопловых лопаток более высоких ступеней турбин высокого и низкого давления нецелесообразно из-за повышенной плотности, необходимости применения высокотемпературной термообработки и особенностей литейных характеристик и склонности к образованию ростовых дефектов типа *freckles* при кристаллизации в условиях пониженного температурного градиента.

Существенное повышение жаропрочных свойств и эксплуатационных характеристик монокристаллических лопаток достигнуто благодаря применению жаропрочных никелевых сплавов, легированных рением и рутением [29], например сплава ВЖМ4, в котором сформировано при определенных технологических процессах наноструктурированное состояние материала. К таким процессам относятся созданные во ФГУП «ВИАМ» технологии высокотемпературного вакуумного рафинирования и микролегирования, специальные режимы монокристаллического литья и многоступенчатой термической обработки сплавов. В результате на микроскопическом (атомном) уровне структура монокристаллов из жаропрочных рений-рутенийсодержащих сплавов представлена только двумя фазами – сложнелегированным твердым никелевым раствором замещения (матричная γ -фаза) с близким порядком в расположении атомов компонентов сплава в ГЦК кристаллической решетке, в котором равномерно рассеяны высокодисперсные кубовидные частицы γ' -фазы (формирующейся на основе интерметаллического соединения Ni_3Al – упорядоченная ГЦК структура). Кубовидные микрочастицы γ' -фазы (объемная доля ~70%) с достаточно четкой огранкой и средним размером ~400 нм разде-

лены нанопрослойками γ -фазы с поперечным размером 50–90 нм. В прослойках γ -фазы присутствуют квазикубоиды нанокристаллов γ' -фазы размером ~30 нм. При такой структуре материала упрочнение сплава обусловлено сопротивлением, которое оказывают микро- и наночастицы γ' -фазы движущимся дислокациям.

Однако сплав ВЖМ4, содержащий 6% рения и 4% рутения, при высоком уровне жаропрочности ($\sigma_{100}^{1000} = 305$ МПа) имеет повышенную плотность ($d = 8,87$ г/см³) и весьма дорог, а его свойства значительно превышают требуемые показатели для рабочих и сопловых лопаток высоких ступеней турбин высокого и низкого давления.

Работы ФГУП «ВИАМ» по созданию новых жаропрочных сплавов связаны с разработкой составов сплавов, металлургии их производства, технологии прецизионного литья охлаждаемых лопаток с равноосной, направленной и монокристаллической структурами, а также с созданием специализированного литейного оборудования [1–11, 13–22]. Работы по созданию сплавов проводили параллельно с разработкой двигателей нового поколения.

Разработка жаропрочных никелевых литейных сплавов базируется на следующих положениях:

- многокомпонентное легирование γ -твердого раствора и γ' -фазы для обеспечения высокой фазовой и структурной стабильности сплавов;
- упрочнение границ зерен для сплавов с равноосной и направленной структурой, которое достигается за счет карбидных выделений, а также микролегированием бором и цирконием;
- достижение оптимальной разности параметров кристаллических решеток γ' -фазы и γ -твердого раствора, которое обеспечивает получение правильно ограниченных кубических выделений вторичной упрочняющей γ' -фазы;
- сведение к минимуму вероятности образования ТПУ фаз (σ - и μ -фаз, фаз Лавеса) и карбидов типа M_6C .

При оптимальном фазовом составе сплавов (содержание γ' -фазы ~60–65%, размер ~0,35–0,45 мкм, кубическая морфология частиц упрочняющей γ' -фазы) уровень жаропрочности и температурной работоспособности сплавов тем выше, чем больше они легированы тугоплавкими элементами. Тугоплавкие элементы (вольфрам, тантал, рений)

повышают температурную область существования γ' -фазы и эффективно тормозят диффузионные процессы, контролирующие высокотемпературную ползучесть [27]. Однако применение тугоплавких элементов ограничено из-за чрезмерного увеличения плотности сплавов, а также возможности образования в структуре избыточных фаз на основе ОЦК твердых растворов элементов в вольфраме или топологически плотноупакованных фаз (ТПУ фазы), приводящих к значительному снижению жаропрочности и пластичности.

Многочисленные структурные исследования, а также анализ эксплуатационных повреждений лопаток с равноосной структурой показывают, что в большинстве случаев зарождение трещин и их развитие при статическом, циклическом и термоциклическом нагружении связано с границами зерен, прочность которых и определяет свойства материала лопаток и их поведение при эксплуатации. Устранение из структуры отливки поперечных составляющих границ зерен, расположенных перпендикулярно действующим напряжениям за счет применения процесса направленной кристаллизации, позволяет значительно повысить механические свойства жаропрочных сплавов.

Разработка специально легированных сплавов [24] для направленной кристаллизации (ЖС26-ВНК, ЖС26У-ВНК, ЖС30-НК, ЖС32-ВНК) и процесса направленной кристаллизации позволила в ГТД четвертого поколения реализовать температуру газа ~1700 К перед рабочими лопатками первой ступени. Свойства сплавов для направленной кристаллизации и области их применения представлены в табл. 1 [13].

По свойствам отечественные сплавы с направленной структурой не уступают зарубежным сплавам аналогичного назначения MAR-M200, MAR-M247, CM247 и др.

Внедрение направленной кристаллизации обеспечило для сплава:

- ЖС26 – создание рабочих лопаток турбины высокого давления для двигателя РД-33, турбины низкого давления для двигателя Д-436 и др., увеличение ресурса лопаток двигателя Д18Т с 1000 до 4000 ч, для двигателя ПС-90 – более 4000 ч;
- ЖС26У – создание рабочих лопаток для изделий «79» и «65» и сопловых лопаток для двигателя Д-436;

Таблица 1

Свойства жаропрочных сплавов с направленной структурой

Сплав	Плотность, г/см ³	σ_{100}^{900} , МПа	σ_{100}^{1000} , МПа	σ_{100}^{1100} , МПа
ЖС6У-РК	8,4	350	170	65
ВЖЛ12У-РК	7,9	324	147	—
ВЖЛ20-ВНК	8,0	350	170	—
ЖС26-ВНК	8,54	400	200	85
(ЖС26У-ВНК)				
ЖС30-НК	8,63	400	200	80
ЖС32-ВНК	8,8	480	250	120

– ЖС30 – повышение температуры материала лопаток на 20–30°C для двигателя НК-86, эксплуатацию самолета Ил-86 во всеклиматических условиях и увеличение ресурса изделий «Р» и «Е»;

– ЖС32 – увеличение ресурса рабочих лопаток турбины высокого давления двигателя РД-33 с 300 до 1000 ч, двигателя АЛ-31Ф – с 700 до 1500 ч, двигателя Д18Т – более 10000 ч;

– ВЖЛ20 – опробование для литья лопаток турбины низкого давления двигателя НК-93.

Сплав ЖС26У на порядок более жаростойкий, чем сплав ЖС26, и сопоставим по жаростойкости со сплавами ЖС6У и ЖС32.

Следует отметить, что согласно многочисленным результатам структурных исследований, проведенных во ФГУП «ВИАМ» [11–22], температура металла в наиболее горячих сечениях лопаток на некоторых двигателях превышает максимально рекомендуемую для используемых сплавов. Отмечаются забросы и длительное воздействие температур >1100°C, что естественным образом влияет на ресурс двигателей ПС-90А, Д18Т, РД-33 и др. Проблему возможно решить, применяя более жаропрочные сплавы или эффективные системы охлаждения лопаток.

Особое место среди сплавов для направленной кристаллизации занимает разработанный в 1984 г. легированный рением сплав ЖС32-ВНК [30]. Сплавы с рением для направленной кристаллизации аналогичного легирования появились за рубежом значительно позднее, к числу таких сплавов можно отнести сплавы CM186L, CMSX468 и PWA1426. Рений, распределяясь преимущественно в γ' -твердом растворе, эффективно влияет на его упрочнение, стабилизирует размеры упрочняющей γ' -фазы, резко тормозит коагуляцию γ' -фазы при длительных высокотемпературных нагревах, повышая температурный уровень работоспособности и термической стабильности сплава [19, 22].

Несмотря на высокую стоимость сплава ЖС32, содержащего 4% рения, он является одним из наиболее перспективных и внедрен на ряд двигателей – АЛ-31Ф, РД-33, Д18Т, Д27. Применение сплава ЖС32-ВНК позволило в 2–3 раза увеличить ресурс вышеуказанных двигателей и обеспечить создание конкурентоспособной авиационной техники.

Следующим этапом развития метода направленной кристаллизации и совершенствования структуры жаропрочных сплавов стало получение монокристаллических отливок. Кроме полного отсутствия большеугловых границ зерен, повышение прочностных характеристик в монокристаллических структурах может быть достигнуто путем подбора оптимальной кристаллографической ориентации относительно действующих напряжений.

Значительное повышение свойств жаропрочных монокристаллических сплавов было достигнуто только после разработки сплавов со специальным легированием, предназначенных только

для монокристаллического литья. Из состава таких сплавов были исключены легирующие элементы – упрочнители границ зерен (В, Zr, С). В результате этого значительно повышается температура солидус сплава (до 1300°C и выше), что в свою очередь позволяет использовать композиции сплавов с более высокой температурой растворения γ' -фазы. Значительный прогресс в повышении уровня свойств монокристаллических сплавов был достигнут при использовании в качестве легирующих элементов рения и рутения [29].

Основные этапы в разработке отечественных и зарубежных сплавов для монокристаллического литья представлены в табл. 2 [22].

Для изготовления рабочих и сопловых лопаток с поликристаллической структурой турбин высокого и низкого давления, в том числе цельнолитых роторов высокого давления, с целью увеличения показателей экономичности и ресурса газотурбинных авиационных двигателей самолетов и вертолетов, требуются литейные фазово-стабильные жаропрочные сплавы с повышенными характеристиками удельной длительной прочности, работоспособные до 1050°C, которые по своим физико-механическим свойствам превосходили бы существующие литейные поликристаллические жаропрочные сплавы равноосной кристаллизации.

В настоящее время в России для литья методом равноосной кристаллизации рабочих и сопловых турбинных лопаток, а также других деталей ГТД с поликристаллической структурой широко используется отечественный жаропрочный никелевый сплав марки ЖС6У с удельной длительной прочностью $\sigma_{100}^{1000}/d=19,83$ МПа/г·см³. Однако в процессе эксплуатации при рабочих температурах до 1050°C материал лопаток из этого сплава проявляет склонность к образованию вредных фаз (карбиды типа Me₆C, ТПУ фазы) в связи с недостаточной фазовой стабильностью, которую можно характеризовать параметром ΔE , что ограничивает их ресурс.

Параметр фазовой стабильности ΔE определяется следующим образом:

$$\begin{cases} \Delta E = E_{\text{спл}} - E_0 \\ E_0 = 0,036 A_{\text{спл}} + 6,28 \end{cases}$$

где $A_{\text{спл}} = \sum_{i=1}^n A_i C_i$; $E_{\text{спл}} = \sum_{i=1}^n E_i C_i$; A_i , E_i и C_i – соответственно атомная масса, количество валентных электронов и атомная доля i -го компонента в сплаве; n – количество компонентов, включая основу сплава, без учета углерода, микродобавок бора, редкоземельных элементов (лантан, церий, иттрий и др.) и примесей.

Величина и знак ΔE определяют вероятность протекания фазовых превращений с образованием в (γ/γ')-MeC структуре сплава нежелательных фаз различного типа. В сплавах с большим отрицательным значением параметра ΔE ($\Delta E < 0$) вели-

Таблица 2

Химический состав и плотность монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов

Сплав	Плотность, г/мм ³	Содержание, % (по массе), легирующих элементов										
		Cr	Ti	Mo	W	Re	Ta	Al	Co	Nb	Hf	другие
		Сплавы первого поколения										
ЖС30М	8,635	–	1,8	0,6	11,7	–	–	5,1	7,5	1,1	0,1	–
ЖС40	8,84	6,1	–	4,0	6,9	–	7,0	5,6	0,5	0,2	–	–
PWA-1480	8,70	10,0	1,5	–	4,0	–	12,0	5,0	5,0	–	–	–
CMSX-2	8,56	8,0	1,0	0,6	8,0	–	6,0	5,6	5,0	–	–	–
CMSX-3	8,60	8,0	1,0	0,6	8,0	–	6,0	5,6	4,6	–	0,1	–
SRR99	8,56	8,0	2,2	–	10,0	–	3,0	5,5	5,0	–	–	–
RR2000	7,87	10,0	4,0	3,0	–	–	–	5,5	15,0	–	–	1,0V
MC2	8,63	8,0	1,5	2,0	8,0	–	6,0	5,0	5,0	–	–	–
AMI	8,59	7,8	1,1	2,0	5,7	–	7,9	5,2	6,5	–	–	–
AM3	8,25	8,0	2,0	2,25	5,0	–	3,5	6,0	5,5	–	–	–
DD3	8,2	9,5	2,0	4,0	5,5	–	–	5,8	5,0	–	–	–
Сплавы второго поколения												
ЖС36	8,724	4,0	1,1	1,6	11,7	2,0	–	5,8	7,0	1,1	–	–
CMSX-4	8,70	6,5	1,0	0,6	6,0	3,0	6,5	5,6	9,0	–	0,1	–
Rene N5	8,63	–	–	2,0	5,0	3,0	7,0	6,2	8,0	–	0,2	0,05C; 0,004B
SCI 80	8,84	5,0	1,0	2,0	5,0	3,0	8,5	5,2	10,0	–	0,1	–
SMP14	–	4,8	–	1,0	7,6	3,9	7,2	5,4	8,1	1,4	–	–
PWA-1484	8,95	5,0	–	2,0	6,0	3,0	8,7	5,6	10,0	–	0,1	–
TMS-71	–	6,0	–	6,4	–	2,5	8,4	5,7	6,0	–	–	–
TMS-82+	8,9	4,9	0,5	1,9	8,7	2,4	6,0	5,3	7,8	–	0,1	–
DD6	8,83	4,3	–	2,0	8,0	2,0	7,5	5,6	9,0	0,5	0,1	–
Сплавы третьего поколения												
Rene N6	8,97	4,2	–	1,4	6,0	5,4	7,2	5,75	12,5	–	0,15	0,05C; 0,004B; 0,01Y
CMSX-10	9,05	2,0	0,2	0,4	5,0	6,0	8,0	5,7	3,0	0,1	0,03	–
CMSX-10M	9,02	2,0	0,24	0,4	5,4	6,5	8,2	5,78	–	0,08	0,03	–
TMS-75	8,90	3,0	–	2,0	6,0	5,0	6,0	6,0	12,0	–	0,1	–
ЖС47	9,089	2,5	–	2,0	1,3	9,3	8,8	5,75	11,0	–	–	0,02Y; 0,02Ce; 0,02 La
Сплавы четвертого поколения												
MC-NG	8,75	4,0	0,5	1,0	5,0	4,0	5,0	6,0	–	–	0,1	4,0Ru; 0,1Si
TMS-138	8,95	3,2	–	2,8	5,9	5,0	5,6	5,9	5,8	–	0,1	2,0Ru
TMS-138A	9,02	3,2	–	2,8	5,6	5,8	5,6	5,7	5,8	–	0,1	3,6Ru
EPM-102 (MX-4)	9,20	2,0	–	2,0	6,0	5,95	8,25	5,55	16,5	–	0,15	–
Сплавы пятого поколения												
TMS-162	1	2,9	–	3,9	5,8	4,9	5,6	5,8	5,8	–	0,1	6,0Ru
TMS-196	9,01	4,6	–	2,4	5,0	6,4	5,6	5,6	4,6	–	0,1	5,0Ru

ка вероятность образования карбидов типа M_6C или ТПУ фаз; сплавы, у которых $\Delta E > 0$, склонны к образованию фаз типа Ni_3Ti и Ni_3Nb , а также эвтектических (перитектических) фаз на основе Ni_3Al ; при выполнении условия $-0,04 \leq \Delta E \leq 0$ сплав считается фазовоустойчивым, т. е. по химическому составу сбалансированным. Расчеты показали, что для сплава ЖС6У величина $\Delta E = -0,11$ [28].

За рубежом для производства методом равноосной кристаллизации турбинных лопаток с поликристаллической структурой используются жаропрочные никелевые сплавы марок MAR-M200 [31], MAR-M246 [32] и др. По своим характеристикам фазовой стабильности и удельной длительной прочности сплавы MAR-M200 ($E = 0,11$; $\sigma_{100}^{1000} / d \approx 20,3$ МПа/г·см⁻³) и MAR-M246 ($\Delta E = 0,15$; $\sigma_{100}^{1000} / d \approx 21,7$ МПа/г·см⁻³) близки к сплаву ЖС6У.

Поскольку в лопатках с монокристаллической структурой отсутствуют большеугловые границы зерен, то отпадает необходимость вводить в ЖНС легирующие элементы (углерод, бор, цирконий, гафний), упрочняющие границы зерен. И хотя в сплавах традиционного легирования содержание этих элементов невелико, исключение их из химического состава и оптимизация легирующего комплекса, включающего вольфрам, молибден, титан, хром, кобальт и др., приводят к значительному изменению свойств монокристаллических сплавов – фазового состава, температуры фазовых превращений и механических свойств [11–19, 22]. В частности, отсутствие углерода и бора существенно повышает температуру плавления (до 1360°C), сопротивление ползучести, а также температуры механической и термической выносливости, поскольку не образуются карбиды и бориды. Таким образом, фазовый состав монокристаллических ЖНС состоит из сложнолегированного γ -твердого раствора на основе никеля и интерметаллидной γ' -фазы.

Жаропрочный никелевый сплав ЖС6УМ [33] является модификацией сплава ЖС6У, содержание основных легирующих элементов находится в пределах ТУ на сплав ЖС6У. Сплав предназначен для изготовления рабочих и сопловых лопаток и других литых деталей турбины, работающих длительно при температурах до 1050°C, при кратковременных забросах температуры до 1100°C. Оптимизированный сплав ЖС6УМ обладает более высокими характеристиками кратковременной и длительной пластичности и предназначен для замены сплава ЖС6У-ВИ в конструкциях новых ГТД.

Жаропрочные никелевые сплавы ЖС26 [34], ЖС26У [35] и ЖС26УМ [36] применяются для получения отливок с направленной или монокристаллической структурой в установках с жидкометаллическим охлаждением (УВНК-8П, УВНК-9). Сплавы предназначены для изготовления рабочих и сопловых лопаток ТВД, работающих длительно при температурах до 1100°C, при кратковременных забросах температуры до 1150°C с жаростойкими защитными покрытиями.

Аналогом сплаву ЖС26 является сплав MAR-M200 DS направленной кристаллизации [31], имеющий близкие значения характеристик длительной прочности. Сплав ЖС26 широко применяется для литья рабочих лопаток ГТД для гражданской и военной авиации. Обладает высокой технологичностью и термической стабильностью. На двигателях транспортной и гражданской авиации применение сплава ЖС26 обеспечивает ресурс лопаток с защитными покрытиями, превышающий ≥ 4000 ч. Ресурс лопаток форсированных ГТД для военной авиации находится на уровне 400–500 ч.

Недостатком сплава ЖС26 является его низкая жаростойкость вследствие легирования сплава ванадием. Модернизация сплава ЖС26, связанная с исключением из состава сплава ванадия и введением в состав сплава малых добавок гафния (сплав ЖС26У), повысила характеристики жаростойкости сплава ЖС26У до уровня жаростойкости сплава ЖС6У-ВИ. Это обстоятельство позволило рекомендовать сплав ЖС26У для литья как рабочих, так и сопловых лопаток. Сплав ЖС26У нашел применение в качестве материала рабочих лопаток ГТД для изделий «79», «65» и сопловых лопаток двигателя Д-436.

При освоении процесса направленной кристаллизации сопловых лопаток двигателей Д18 и Д-436 выявлена недостаточная технологичность сплава ЖС26У при литье крупногабаритных сопловых лопаток сложной конфигурации с развитыми полками. При кристаллизации лопаток в установках УВНК с жидкометаллическим охлаждением в местах с затрудненной усадкой в отливках отмечались случаи образования горячих кристаллизационных трещин.

Проблема повышения технологичности сплава решена путем исключения гафния из состава сплава и замены его малыми добавками тантала (0,25–0,6%). Модернизированный сплав ЖС26УМ не склонен к образованию горячих трещин и рекомендуется в качестве высокотехнологичного сплава с повышенной жаростойкостью для литья рабочих и сопловых лопаток перспективных ГТД. Анализ механических свойств сплавов группы ЖС26, ЖС26У и ЖС26УМ показывает практически полную их идентичность. Рабочие лопатки из жаропрочных сплавов этой группы применяются после термической обработки.

Развитие современных авиационных ГТД и энергетических ГТУ привело к необходимости создания специальных жаропрочных никелевых сплавов для литья монокристаллических лопаток газовой турбины, работающих в экстремальных условиях (высокие температуры – порядка $0,8 T_{пл}$, большие механические напряжения, длительная эксплуатация – до 10000 ч, агрессивные среды). Эти сплавы с чрезвычайно сложным строением на различных иерархических уровнях являются многокомпонентными системами, содержащими до 12 легирующих и микролегирующих элементов

Периодической системы Д.И. Менделеева. Обычный способ создания таких материалов путем оптимизации традиционного легирующего комплекса, включающего вольфрам, молибден, хром, кобальт, гафний, титан, ниобий и др., в настоящее время себя полностью исчерпал. Поэтому современная тенденция развития литейных жаропрочных никелевых сплавов заключается в использовании дефицитных элементов VII и VIII группы Периодической системы Д.И. Менделеева, таких как рений и рутений. Это привело к созданию жаропрочных никелевых сплавов для направленной кристаллизации и монокристаллического литья:

– второго поколения, содержащих до 4% рения (ЖС36, ЖС32, ВЖМ4, CMSX-4, Rene N5 и др.), с уровнем жаропрочности $\sigma_{1000}^{1000} = 250-260$ МПа;

– третьего поколения, включающего группу сплавов, содержащих до 7% рения (CMSX-10, Rene N6, TMS-75 и др.), с уровнем жаропрочности $\sigma_{1000}^{1000} = 280-290$ МПа, а также сплавы с содержанием рения 8,5–9,5% (ЖС55, ЖС47 (ВЖМ1)) с уровнем жаропрочности $\sigma_{1000}^{1000} = 330-350$ МПа. Однако легирование сплавов рением, существенно повышая длительную прочность сплавов, приводит к повышению их плотности и увеличению вероятности выделения вредных топологически плотноупакованных ТПУ фаз. Для снижения склонности сплавов к образованию ТПУ фаз предлагается легировать их рутением;

– четвертого поколения, содержащих 4–6% рения и 2–4% рутения (MC-NG, TMS-138, EPM-102);

– пятого поколения, содержащих 5–6,5% рения и 5–6% рутения.

Сплав ЖС32 имеет пределы легирования, % (по массе):

Углерод	0,02–0,5
Хром	2,0–10
Кобальт	5,0–15
Вольфрам	2,0–10
Молибден	0,5–5,0
Ниобий	1,1–5,0
Алюминий	4,5–8,0
Бор	0,01–0,3
Ванадий	0,1–3,0
Церий	0,0005–0,1
Лантан	0,001–0,2
Рений	1,0–5,0
Тантал	1,0–9,0
Никель	остальное

Сплав нашел широкое применение в промышленности и является наиболее жаропрочным серийным сплавом для направленной кристаллизации и монокристаллического литья.

В дальнейшем на основе сплава ЖС32 был создан сплав ЖС32У (ВЖМ3) [37] для направленной кристаллизации и монокристаллического литья. Сплав имеет состав, % (по массе):

Углерод	0,05–0,12
Хром	5,0–6,0
Кобальт	8,0–10,0
Вольфрам	6,5–7,5
Молибден	0,8–1,5
Ниобий	0,6–1,0
Алюминий	5,5–6,0
Тантал	4,4–5,4
Рений	3,8–4,6
Бор	0,001–0,02
Церий	0,05–0,1
Иттрий	0,001–0,002
Лантан	0,001–0,05
Неодим	0,00005–0,05
Никель	остальное

при соблюдении условия: $5,5 \leq (1/2W + 1/2Re + 1/2Ta + Mo + Nb) \leq 10,5$. Сплав обладает более высокой фазовой и структурной стабильностью благодаря сбалансированному составу по сравнению со сплавом ЖС32-ВНК.

Сплав ЖС32У (ВЖМ3) – монокристаллический, с ориентацией оси в кристаллографическом направлении $\langle 001 \rangle$. Допускаемое отклонение от ориентации $\langle 001 \rangle$ не более 10 град. Сплав предназначен для изготовления монокристаллических литых (и/или с направленной столбчатой структурой) рабочих и сопловых лопаток и других литых деталей турбины, работающих длительно при температурах до 1100°C (при забросах температуры до 1150°C), с жаростойкими покрытиями.

Экономнолегированные рением (~2%) сплавы ЖС36 [38] и его модификация ЖС36С [39] имеют высокий уровень жаропрочности и термической стабильности, который обусловлен ограничением или полным исключением из состава сплавов зернограничных элементов, таких как углерод и бор. Модификация сплава ЖС36С [39] в результате регламентированного легирования сплава углеродом обеспечивает его большую технологичность при отливке монокристаллических лопаток и уменьшает склонность сплавов с ограниченным содержанием рения к объемной рекристаллизации при проведении термической обработки.

Металлургические способы производства, регламентирующие порядок и количество вводимых РЗМ [40] при изготовлении шихтовой заготовки, обеспечивают полное глубокое рафинирование металла, минимизацию содержания вредных примесей, кислорода и азота, повышают выход годных отливок при монокристаллическом литье и прочностные свойства сплавов.

Повышение уровня прочностных и эксплуатационных характеристик жаропрочных сплавов, увеличение выхода годных по структуре монокристаллических отливок обеспечивается применением высокоградиентной технологии монокристаллического литья, а также разработками, связанными с

формированием монокристаллической структуры и ее ростом в процессе направленной кристаллизации отливок лопаток. В частности, в работе [41] предлагается устройство для получения монокристаллических отливок, значительно повышающее их структурное совершенство и соответственно увеличивающее прочностные характеристики, в особенности на длительных базах испытаний с одновременным увеличением выхода годного литья путем исключения образования посторонних кристаллов в зоне зарождения. Устройство обеспечивает точность заданной ориентации и структурное совершенство (разориентацию блоков) в 2–3 раза.

В работе [42] предлагаются способы, обеспечивающие формирование монокристаллической структуры отливок лопаток с развитыми замковыми и бандажными полками.

Применение сплавов ЖС32У-ВНК, ЖС36 МОНО и усовершенствованной технологии монокристаллического литья обеспечивает достижение уровня длительной прочности $\sigma_{40}^{975} = 330\text{--}340$ МПа и значение длительной прочности на базе испытаний $1000\text{ ч} - \sigma_{1000}^{1000} = 160$ МПа.

Эффективным методом повышения циклической прочности отливок, как известно, является газостатическое прессование лопаток (ГИП). Возникающие при этом проблемы, связанные с изменением поверхностного слоя лопаток в результате воздействия остаточного кислорода в аргоне, решаются способами, представленными в работах [43, 44]. В работе [43] вопрос защиты поверхности решается нанесением на полностью обработанную лопатку защитного алюминидного покрытия перед операцией ГИП. В патенте [44] лопатку или ее часть перед ГИП погружают в керамический порошок на основе огнеупорных оксидов с температурой плавления $1400\text{--}2800^\circ\text{C}$ и дисперсностью – от 0,01 до 17 мкм. Техническим результатом является предотвращение окисления лопатки в процессе ГИП.

Следует отметить, что аналогичный способ защиты поверхности лопаток в керамическом порошке или обмазке при проведении длительной высокотемпературной гомогенизации ранее предложен в работе ФГУП «ВИАМ» [45] и обеспечивал большую полноту гомогенизации сплавов и сокращение продолжительности термической обработки отливок.

В США разработкой композиций сплавов, технологией литья и термической обработкой занимаются фирмы: Cannon-Muskegon Corporation, United Technologies Corporation, Howmet Corporation и General Electric Company. В области ренийсодержащих монокристаллических сплавов отмечаются следующие тенденции.

В работе [46] представлен сплав компании Cannon-Muskegon Corporation следующего химического состава, % (по массе):

Кобальт	9,3–10,0
Хром	6,4–6,8
Молибден	0,5–0,7
Вольфрам	6,2–6,6
Тантал	6,3–6,7
Алюминий	5,45–5,75
Титан	0,8–1,2
Гафний	0,02–0,12
Рений	2,8–3,2
Никель	остальное

Определены условия термической обработки отливок. На базе заявленной композиции разработан сплав CMSX-4, наиболее распространенный и широко используемый монокристаллический сплав второго поколения.

В патентах этой фирмы [47–49] предлагаются варианты легирования сплава CMSX-4 зернограничными упрочнителями, % (по массе): 0,8–1,5 гафния, 0,06–0,08 углерода, обеспечивающими повышение выхода годного литья путем уменьшения требований к структуре отливок монокристаллических лопаток, т. е. возможности использования лопаток с границами зерен. Сплавы предназначаются главным образом для литья лопаток сложной конфигурации, к которым относятся сопловые лопатки. Сплавы, легированные зернограничными упрочняющими элементами, имеют более низкий уровень свойств и рекомендуются к применению в литом состоянии или с неполной гомогенизацией и последующим старением. Это направление также развито в других странах, что подтверждается многочисленными патентами.

В патентах фирмы United Technologies Corporation [50–56] предлагаемое решение проблемы создания жаропрочного сплава с повышенным уровнем жаропрочности связано с использованием базовых композиций следующего состава, % (по массе):

Хром	4,75–5,25
Кобальт	9,5–10,5
Вольфрам	5,6–6,2
Тантал	8,4–9,0
Алюминий	5,5–5,8
Молибден	1,7–2,1
Рений	2,8–3,2

В отличие от компании Cannon-Muskegon Corporation в составах патентуемых сплавов уменьшено содержание хрома и повышено содержание молибдена. Оптимизацию составов предлагается производить на основе аналитического уравнения, учитывающего влияние легирующих элементов. Представлено уравнение для выбора наилучших композиций из указанных пределов:

$$P = 200\text{Cr} + 80\text{Mo} + 20\text{Mo}_2 + 200\text{W} + 14\text{W}_2 + 30\text{Ta} + 1,5\text{Ta}_2 + 2,5\text{Co} + 1200\text{Al} + 100\text{Al}_2 + 100\text{Re} + 1000\text{Hf} + 2000\text{Hf}_2 + 700\text{Hf}_3.$$

Высокий уровень свойств обеспечивается при значениях коэффициента $P \geq 4000$. Предлагаются способы термической обработки, обеспечивающие получение структуры отливок без оплавления с размером упрочняющей γ' -фазы – менее 0,5 мкм.

В патентах фирмы Howmet Corporation [57–59] рассмотрены вопросы легирования сплава состава, % (по массе):

Кобальт	9,3–10,0
Хром	6,4–6,8
Молибден	0,5–0,7
Вольфрам	6,2–6,6
Тантал	6,3–6,7
Алюминий	5,45–5,75
Титан	0,8–1,2
Гафний	0,07–0,12
Рений	2,8–3,2
Углерод	0,01–0,08

Углерод рекомендуется в качестве малой добавки для повышения чистоты отливок от оксидных включений и качества поверхности отливок лопаток.

В работе [60] компании Howmet Corporation ГИП предлагается для залечивания пористости защитных покрытий, что повышает сопротивление горячей коррозии, устраняя растрескивание покрытий при термоциклических нагрузках.

В работе [61] предлагается использовать ГИП для оптимизации структуры (залечивание микропористости) монокристаллического жаропрочного сплава с целью уменьшения склонности к водородному охрупчиванию и повышению циклической прочности лопаток, перекачивающих жидкий водород и кислород. В работе [61] компании Allied Signal Inc. (США) также рассматривается возможность улучшения свойств сплава, легированного до 3% рения посредством замены последнего рутением. При этом после такой замены отмечается стабилизация свойств сплава.

В патентах [62–64] компании ABB Research Ltd (Швейцария) предлагается легирование сплава CSMX-4 малыми добавками 0,15–0,3 гафния, 0,02–0,04 углерода, 0,001–0,01 бора и магния для повышения технологичности сплава при литье крупногабаритных лопаток. Легирование зернограницными добавками увеличивает выход годных отливок при монокристаллическом литье путем расширения допустимой разориентации субзерен и толерантности с отдельными границами в монокристаллическом литье.

В разработке [64] компании ABB также рассмотрены вопросы, связанные с исключением возможной рекристаллизации монокристаллических отливок лопаток из сплава CMSX-4 при проведении термической обработки. Предложены режимы термической обработки, устраняющие поверхностную и объемную рекристаллизацию. Патент имеет прикладное значение для отливок из безуглеро-

дистых жаропрочных сплавов. В патентах [65], выданных японским фирмам, предлагаются способы оптимизации химического состава сплавов, обеспечивающие повышение прочностных и технологических свойств, например, данный факт отражен в работе компании Masahiko Daido Steel Co Ltd.

Большой интерес представляют приведенные в патенте [66] компании Independent Administrative Institution National Institute for Material Science (Япония) сплавы составов, % (по массе):

Кобальт	4,0–11,0
Хром	3,5–5,0
Молибден	0,5–3,0
Вольфрам	7,0–10,0
Алюминий	4,5–6,0
Титан	0,1–2,0
Тантал	5,0–8,0
Рений	1,0–3,0
Гафний	0,01–0,5
Кремний	0,01–0,1

с суммарным количеством хрома и рения – не менее 4, а рения, молибдена, вольфрама и хрома – не более 18.

Сплав состава, % (по массе):

Кобальт	7,8
Углерод	4,9
Молибден	1,9
Вольфрам	8,7
Алюминий	5,3
Титан	0,5
Тантал	6,4
Рений	2,4
Кремний	0,01
Гафний	0,1

обеспечивает достижение значений $\sigma_{40}^{975} = 330–340$ МПа.

В патенте [67] компании Hitachi Ltd (Япония) высокий уровень жаропрочности, сопротивление горячей коррозии и окислению сплава состава, % (по массе):

Хром	3,0–7,0
Кобальт	9,5–15,0
Вольфрам	4,5–8,0
Рений	3,3–6,0
Тантал	4,0–8,0
Титан	0,8–2,0
Алюминий	4,5–6,5
Гафний	0,01–0,2
Молибден	$\leq 0,5$
Углерод	$\leq 0,01$
Бор	$\leq 0,005$
Цирконий	$\leq 0,01$
Кислород	$\leq 0,005$
Азот	$\leq 0,005$
Никель	остальное

обеспечивается, если значения параметра $Md(t)$ сплава находятся в пределах 0,975–0,995, а значе-

ние В – в пределах 0,650–0,675. Для лучших композиций значения долговечности составляют $\tau_{137}^{1040} = 1062\text{--}1162$ ч и $\tau_{206}^{982} = 820\text{--}877$ ч. Следует отметить, что оптимальные свойства сплава обеспечиваются при повышенных по сравнению с традиционно применяемыми содержаниями кобальта 10,5–12,5% (по массе).

Компания Heavy Industries Co. Ltd (Япония) получила ряд патентов [68, 69] на жаропрочные монокристаллические сплавы, легированные рением (National Institute for Materials Science). Жаропрочный никелевый монокристаллический сплав имеет следующий химический состав, % (по массе):

Алюминий	5,0–7,0
Тантал	4,0–10,0
Молибден	1,1–4,5
Вольфрам	4,0–10,0
Рений	3,1–8,0
Гафний	0–0,50
Хром	2,0–5,0
Кобальт	0–9,9
Рутений	4,1–14,0
Никель, примеси	остальное

Жаропрочный фазовостабильный никелевый монокристаллический сплав, в котором при высоких температурах не отмечается выделений ТПУ фаз, что и обеспечивает высокий уровень длительной прочности.

В заявке [70] компании National Research Institute for Metal (Япония) на монокристаллический жаропрочный никелевый сплав и способ его производства предлагается состав жаропрочного сплава с высокой жаропрочностью, простой термической обработкой, мало склонного к образованию вредных фаз и высоким сопротивлением горячей коррозии. Приведен следующий состав сплава, % (по массе):

Кобальт	7,0–15,0
Хром	0,1–4,0
Молибден	1,0–4,0
Вольфрам	4,0–7,0
Алюминий	5,5–6,5
Тантал	5,0–7,0
Рений	4,0–5,5
Гафний	0–0,5
Ванадий	0–0,5
Титан	0–2,0
Ниобий	0–2,0
Никель, примеси	остальное

Ограничение содержания в сплаве хрома, определяющего сопротивление горячей коррозии, компенсируется увеличенным содержанием рения (до 5%) и кобальта (12% – оптимальное значение). После выдержки при 1100°C в течение 1000 ч в сплаве образуется незначительное количество ТПУ фаз (не более 4%), в то время как в сплаве CMSX-10 – более 20%. Предлагаемый сплав имеет при средних температурах такие же свойства, как и сплав CMSX-10, превосходя последний при высоких температурах и

длительных испытаниях. Сплав характеризуется простой термической обработкой, заключающейся в двух-четырёхступенчатой гомогенизации (1300°C в течение 1 ч + 1320°C в течение 5 ч) и двойном старении при 1150°C в течение 4 ч + 870°C в течение 20 ч.

В работе [71] компании Heavy ind. Co. Ltd (Япония) повышение температуры плавления и сопротивления ползучести никелевого жаропрочного сплава достигается путем специального легирования кремнием, который обычно рассматривается как примесь. Сплав имеет следующий состав, % (по массе):

Рений	2,0–7,0
Молибден	0,5–5,0
Вольфрам	2,0–6,0
Хром	0–5,0
Алюминий	3,0–6,0
Тантал	3,0–8,0
Кремний	>(0–2,0)
Никель, примеси	остальное

При добавлении кремния в количестве >(0–2,0)% (по массе), особенно в большом количестве 0,05–2,0% (по массе), может быть повышена температура плавления и достигнуто упрочнение твердого раствора, увеличены прочность и сопротивление ползучести при высоких температурах.

На основании вышеизложенного можно заключить, что наиболее интенсивные разработки по проблеме создания высокожаропрочных никелевых сплавов четвертого и пятого поколений, легированных рением и рутением и предназначенных для отливки монокристаллических лопаток, ведутся в США (компании GE Co., GE Aircraft Engines, Pratt&Whitney, NASA), Японии (NIMS–National Institute for Materials Science), Франции (ONERA) и России (ФГУП «ВИАМ»).

Большой объем работ по разработке и патентованию поликристаллических жаропрочных никелевых сплавов проводится во ФГУП «ВИАМ». Среди наиболее интересных следует выделить следующие изобретения.

В 1996 г. получен патент [72] на литейный жаропрочный сплав на основе никеля, который предназначен для изготовления рабочих и сопловых лопаток газотурбинных двигателей с равноосной и направленной структурой. Сплав содержит, % (по массе):

Углерод	0,05–0,2
Хром	7,0–14,0
Кобальт	8,0–15,0
Вольфрам	9,0–12,0
Молибден	0,7–3,0
Ниобий	0,5–4,0
Титан	1,0–4,0
Алюминий	4,0–6,0
Бор	0,0005–0,07
Цирконий	0,01–0,10
Церий	0,002–0,025
Иттрий или скандий	0,0013–0,0085
Никель	остальное

при соблюдении условия $Ce : Y$ (или Sc) = 1,5–3,0 (% по массе). Сплав с поликристаллической структурой равноосной кристаллизации имеет следующий уровень свойств: при температуре 975°C и напряжении 226 МПа время до разрушения составляет 60–135 ч; при температуре 1050°C и напряжении 108 МПа время до разрушения составляет 115–240 ч. Дополнительные исследования показали, что этот сплав обладает низкой пластичностью при комнатной температуре (~3%) и недостаточно высокой фазовой стабильностью ($\Delta E = -0,11$) при рабочей температуре 1000°C и ресурсе свыше 1000 ч.

В патенте [73], полученном в 2000 г., предложен литейный жаропрочный сплав на никелевой основе для изготовления рабочих и сопловых лопаток с равноосной и направленной структурой. Сплав содержит, % (по массе):

Углерод	0,13–0,20
Хром	8,0–9,5
Кобальт	9,0–10,5
Вольфрам	9,5–11,0
Молибден	1,2–2,4
Ниобий	0,8–1,2
Титан	2,0–2,9
Алюминий	5,1–6,0
Бор	0,005–0,035
Цирконий	0,01–0,05
Церий	0,002–0,02
Один элемент из группы, включающей иттрий и скандий	0,002–0,02
Один элемент из группы, включающей лантан и празеодим	0,0008–0,008
Никель	остальное

при соблюдении условия $Ce : Y(Sc) : La(Pr) = 2,5 : 1,0 : 1,0$ (% по массе). Сплав с равноосной структурой обладает высокой жаростойкостью при одновременно высоком уровне жаропрочных свойств: время до разрушения при 975°C и напряжении 230 МПа составляет 80–100 ч; при температуре 1050°C и напряжении 110 МПа составляет 180–220 ч. Однако сплав обладает недостаточно высокой фазовой стабильностью ($\Delta E = -0,06$).

В патенте [74], полученном в 2000 г., описан литейный жаропрочный сплав на основе никеля для рабочих и сопловых лопаток газотурбинных двигателей с равноосной и направленной структурой, содержащий, % (по массе):

Хром	6,5–10,5
Кобальт	6,0–10,0
Молибден	2,7–4,0
Алюминий	4,8–5,7
Титан	4,2–4,7
Углерод	0,06–0,20
Бор	0,005–0,015
Цирконий	0,01–0,02

Вольфрам	1,0–1,8
Ниобий	0,5–1,0
Церий	0,002–0,015
Ванадий	0,1–1,0
Лантан	0,002–0,02
Кальций	0,001–0,015
Один элемент из группы, включающей иттрий и скандий	0,0015–0,01
Никель	остальное

Сплав отличается сочетанием пониженной плотности (7,78–7,81 г/см³) с высоким уровнем жаропрочности, сопротивлением термоусталости при температурах до 975°C и высокой жидкотекучестью. Дополнительные исследования показали, что этот сплав обладает недостаточно высокой жаропрочностью при рабочих температурах свыше 1000°C.

В патенте [75], полученном в 2003 г., рассмотрен сплав на основе никеля, предназначенный для получения деталей высокотемпературных узлов, турбинных лопаток с монокристаллической структурой для ГТД и ГТУ. Цель изобретения – разработка жаропрочного литейного никелевого сплава, обладающего высоким сопротивлением горячей коррозии и высоким уровнем жаропрочности. Предлагаемый состав сплава обеспечивает получение коррозионной стойкости без снижения уровня жаропрочности; при существенном повышении выхода годных отливок по монокристаллическости за счет резкого снижения числа зародышей посторонних кристаллов, которое достигается путем введения в сплав иттрия. Это связано с тем, что введение в сплав иттрия приводит к снижению содержания в сплаве азота, кислорода и серы, переводя нитриды, сульфиды и оксиды в шлаки, а значит, в сплаве резко уменьшается количество центров зарождения посторонних кристаллов.

В патенте [76], полученном в 2007 г., предложен никелевый жаропрочный сплав для изготовления изделий с монокристаллической структурой. Цель изобретения – получение сплава, обладающего высокой фазовой стабильностью и повышенными характеристиками жаропрочности в интервале температур 1100–1150°C. Повышение высокотемпературной длительной прочности в сплаве достигается благодаря синергетическому действию редкоземельных элементов (лантан, церий и неодим) вместе с тугоплавкими элементами – молибденом и рутением. Высокая фазовая стабильность достигается за счет присутствия в сплаве молибдена и рутения и исключения из состава сплава титана, ниобия и гафния.

В работе [77] ФГУП «ВИАМ» описан жаропрочный сплав на основе никеля с высоким уровнем жаропрочности, фазовой стабильности, жаростойкости и технологичности. Сплав дополнительно содержит тантал, углерод, кремний, железо, марганец. Тантал сегрегирует в межосные

пространства, уменьшает склонность сплава к образованию поверхностных дефектов, тем самым повышая выход годного по монокристалличности. Введение кремния оказывает положительное влияние на сопротивление сплава газовой коррозии. Легирование сплава малыми добавками углерода стабилизирует структуру и снижает склонность сплава к рекристаллизации при проведении термообработки. Железо и марганец, не снижая характеристик жаропрочности, улучшают технологичность сплава.

В патенте [78], полученном в 2009 г., описан жаропрочный литейный сплав на основе никеля, содержащий, % (по массе):

Углерод	0,08–0,20
Хром	4,0–6,0
Кобальт	8,0–10,0
Вольфрам	7,0–10,0
Молибден	0,5–2,0
Ниобий	1,2–2,0
Алюминий	5,0–7,0
Рений	3,0–5,0
Тантал	3,0–5,0
Бор	0,005–0,03
Ванадий	0,01–0,15
Церий	0,001–0,04
Иттрий	0,003–0,04
Лантан	0,001–0,10
Кремний	0,01–0,20
Кислород	0,0001–0,002
Азот	0,0001–0,002
Никель	остальное

при суммарном содержании вольфрама, рения и тантала $15,8 \leq (W+Re+Ta) \leq 17,5$. Сплав предназначен для производства методом направленной кристаллизации деталей высокотемпературных газовых турбин, в том числе монокристаллических лопаток, длительно работающих при температурах свыше 1000°C. Сплав обладает высокой жаростойкостью (привес образцов при температуре испытаний 1050°C в течение 100 ч составляет 0,2–0,3 г/м²·ч) и длительной прочностью: например, время до разрушения при 1000°C и напряжении $\sigma=250$ МПа составляет 175–186 ч, при температуре 1050°C и $\sigma=170$ МПа: 177–180 ч; при температуре 1100°C и $\sigma=120$ МПа: 160–176 ч. Однако, судя по химическому составу, сплав имеет повышенную плотность и недостаточно высокую фазовую стабильность.

В патенте [79], полученном в 2011 г., описан литейный жаропрочный сплав на основе никеля следующего химического состава, % (по массе):

Хром	7,8–9,0
Вольфрам	1,0–3,2
Алюминий	5,0–5,8
Титан	3,1–4,1
Кобальт	9,5–12,5
Цирконий	0,01–0,05

Бор	0,008–0,04
Углерод	0,08–0,16
Молибден	2,8–4,2
Церий	0,002–0,02
Иттрий	0,0015–0,01
Кальций	0,001–0,01
Лантан	0,002–0,02
Тантал	2,0–3,4
Магний	0,001–0,01
Никель	остальное

Сплав предназначен для изготовления поликристаллических сопловых и рабочих лопаток с равноосной структурой для газовых турбин и роторов. Плотность сплава 8,09–8,20 г/см³; при комнатной температуре предел текучести $\sigma_{0,2}=900$ –925 МПа, относительное удлинение $\delta=8,5$ –10%; время до разрушения при испытании на длительную прочность при 900°C и напряжении $\sigma=350$ МПа составляет 85–108 ч, при $\sigma=330$ МПа: 145–170 ч. Сплав обладает высокой фазовой стабильностью ($\Delta E=-0,04$). Однако дополнительные исследования показали, что сплав имеет недостаточно высокие значения пределов прочности и текучести, а также длительной прочности при температурах выше 1050°C.

На основе указанного патента в результате успешного завершения исследований в 2012 г. во ФГУП «ВИАМ» паспортизован сплав низкой плотности марки ВЖЛ21, предназначенный для равноосного литья турбинных лопаток и других деталей с поликристаллической структурой. Сплав ВЖЛ21 имеет при комнатной температуре значение пластичности $\delta \geq 5,5\%$; удельная длительная прочность сплава при 1000°C на базе 100 ч составляет $\sigma_{100}^{1000} / d = 21,37$ МПа/(г·см⁻³).

В патенте [80], полученном в 2010 г., предложен жаропрочный сплав на основе никеля с улучшенными характеристиками жаростойкости, длительной прочности при рабочих температурах 900–1150°C. Повышение указанных характеристик осуществляется путем введения в сплав кальция или магния, которые снижают содержание в сплаве вредных примесей (сера и кислород) и, следовательно, снижают их отрицательное воздействие на жаростойкость и длительную прочность сплава.

В патенте [81], полученном в 2012 г., также предлагается никелевый жаропрочный сплав, который характеризуется низкой плотностью, высокими значениями длительной прочности и фазовой стабильностью. Повышение жаропрочности достигается благодаря действию РЗМ (лантан и церий) на примеси серы, кислорода и азота. Введение бора и углерода используется для стабилизации структуры монокристаллического изделия. Повышение содержания молибдена приводит к увеличению длительной прочности сплава. Понижение содержания вольфрама в сплаве обеспечивает достижение низкой плотности.

Вопросом разработки литейных жаропрочных никелевых сплавов, легированных РЗМ, в России также занимаются: ОАО «НПО „Сатурн”» и АО «НПП газотурбостроения „Салют”».

В изобретении ОАО «НПО „Сатурн”» [82] описан жаропрочный литейный сплав на основе никеля с повышенными характеристиками высокотемпературной прочности и жаростойкости. Сплав имеет сбалансированный состав, поэтому вероятность образования нежелательных фаз очень мала. Жаростойкость сплава увеличивается при введении в его состав скандия и кремния. Кроме того, скандий оказывает рафинирующее действие, связывая серу, фосфор и другие вредные примеси. Жаропрочность сплава повышается путем введения магния.

В изобретениях [83, 84] предложены никелевые жаропрочные сплавы, имеющие высокие значения высокотемпературной прочности при пониженной их стоимости. Повышение жаропрочности сплавов достигается путем введения в их состав РЗМ (церия, иттрия, лантана, скандия, неодима, празеодима) и кремния, корректировки химического состава. Снижение стоимости сплавов осуществляется за счет исключения использования дорогостоящих элементов (рений и рутения) или снижением их содержания в составе.

В работах и изобретениях АО «НПП „Салют”» [23–25, 30, 85–87] предложены жаропрочные монокристаллические никелевые сплавы. Сплавы характеризуются высоким уровнем жаропрочности, улучшенными литейными свойствами и повышенной коррозионной стойкостью. Данные характеристики достигаются благодаря корректировке химического состава сплавов и введению РЗМ (церия, иттрия и лантана), которые обеспечивают стабилизацию структурных дефектов в монокристаллах.

Среди иностранных разработчиков, занимающихся исследованиями в области жаропрочных никелевых сплавов для отливки поликристаллических турбинных деталей, следует выделить ряд американских компаний: General Electric, Cannon-Muskegon Corporation, United Technologies, Honeywell International и другие. Большинство из них патентуют свои разработки не только у себя, но и в других странах мира, включая Индию, Замбию, Австралию и т. д.

Среди американских заявителей следует отметить совместную разработку компаний GE Aircraft Engines, Pratt&Whitney, NASA жаропрочного сплава типа EPM-102 следующего состава, % (по массе):

Хром	2,0
Алюминий	5,55
Тантал	8,25
Вольфрам	6,0
Молибден	2,0
Рений	5,95
Рутений	3,0
Кобальт	16,5
Углерод	0,03
Гафний	0,15

Торговая марка сплава МХ-4 планируется для отливки монокристаллических лопаток с проникающим охлаждением для ГТД истребителя JSF [88].

Компанией National Institute of Materials Science (Япония) разработан никелевый жаропрочный сплав пятого поколения марки TMS 196 [89] состава, % (по массе):

Хром	4,6
Кобальт	5,6
Ванадий	2,4
Вольфрам	5,0
Тантал	5,6
Рений	6,4
Алюминий	5,6
Рутений	5,0
Гафний	0,1
Никель	остальное

Плотность сплава 9 г/см³. Сплав обладает высокой фазовой стабильностью и сопротивлением окислению, так как в его составе повышенное содержание хрома.

Представляет также интерес разработанный фирмой Snesta (Франция) монокристаллический жаропрочный сплав на основе никеля [90] с повышенным сопротивлением ползучести, хорошей структурной стабильностью, плотностью не выше 8,7 г/см³. Сплав имеет следующий химический состав, % (по массе):

Хром	4,5–6,0
Кобальт	0–10,0
Молибден	1,0–3,0
Вольфрам	4,5–7,5
Тантал	3,5–7,0
Титан	0,5–2,0
Ниобий	0–2,0
Алюминий	5–5,6
Рутений	0–3,0
Гафний	0–0,2
Кремний	0–0,2
Рений	2,0–3,5
Иттрий	0–0,05
Сера	0–10 ppm
Никель	остальное

Кроме того, суммарное содержание элементов Al+Ti+Ta+Nb составляет 15–16% (атомн.), а суммарное содержание Mo+W+Re+Ru: 4,2–4,8% (атомн). Сплав применяется для производства монокристаллических лопаток турбин, работающих при высоком уровне температур и напряжений, и имеет хорошую структурную стабильность.

Среди американских изобретений следует отметить, что компанией NASA разработан поликристаллический жаропрочный никелевый рений-содержащий сплав равноосной кристаллизации марки TRW–NASA VIA состава, % (по массе):

Хром	6,1
Кобальт	7,5
Молибден	2,0
Вольфрам	5,8
Тантал	9,0
Ниобий	0,5
Алюминий	5,4
Титан	1,0
Углерод	0,13
Бор	0,020
Цирконий	0,13
Гафний	0,4
Рений	0,5
Никель	остальное

Уровень свойств сплава в литом состоянии: при комнатной температуре – предел прочности 1050 МПа, предел текучести 940 МПа, удлинение 4%; длительная прочность при 980°C на базе 1000 ч составляет 140 МПа [91]. Дополнительные исследования показали, что сплав обладает повышенной плотностью ($d \approx 8,8 \text{ г/см}^3$) и недостаточно высокой фазовой стабильностью ($\Delta E = -0,107$).

Американская фирма Cannon-Muskegon Corporation является одной из наиболее известных по разработке литейных жаропрочных никелевых сплавов для производства турбинных лопаток с равноосной структурой. С 80-х гг. XX в. фирма запатентовала более 20 своих изобретений по указанному направлению.

Наиболее интересной разработкой для применения в условиях высоких температур и деформаций среди сплавов данной фирмы является никелевый жаропрочный сплав марки CM 681 следующего химического состава [92], % (по массе):

Хром	5,0–6,0
Кобальт	9,0–9,5
Молибден	0,3–0,7
Вольфрам	8,0–9,0
Тантал	5,9–6,3
Титан	0,05–0,25
Алюминий	5,6–6,0
Рений	2,8–3,1
Гафний	1,1–1,8
Углерод	0,10–0,12
Бор	0,010–0,024
Цирконий	0,011–0,020
Никель, примеси	остальное

Сплав в литом равноосном и/или направленно закристаллизованном состоянии (структура столбчатых зерен) имеет повышенную прочность и пластичность границ зерен в сочетании с микроструктурной стабильностью. Термическая обработка сплава проводится по режиму: при 1093°C в течение 2 ч (охлаждение в газе) + при 871°C в течение 20 ч (охлаждение в атмосфере воздуха). Сплав марки CM 681 с поликристаллической равноосной структурой зерен имеет

следующие механические свойства при комнатной температуре: предел прочности $\sigma_b = 1230 \text{ МПа}$, условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 889 \text{ МПа}$, относительное удлинение $\delta = 6,9\%$, относительное сужение $\psi = 9,4\%$. Время до разрушения при температуре 843°C и напряжении 552 МПа составляет 102,6–151,5 ч, при температуре 1038°C и напряжении 138 МПа: 115,2–119,5 ч. Однако дополнительные исследования показали, что сплав склонен к образованию повышенного количества ТПУ фаз ($\Delta E = -0,12$), а также обладает повышенной плотностью ($d \approx 8,9 \text{ г/см}^3$).

Среди немецких изобретений следует отметить разработку фирмой Siemens AG никелевого сплава для производства деталей в поликристаллической и/или монокристаллической форме состава [93], % (по массе):

Хром	9,0–11,0
Вольфрам	3,0–5,0
Молибден	0,5–2,5
Алюминий	3,0–3,3
Титан	3,0–5,0
Тантал	3,0–7,0
Кобальт	0–12,0
Ниобий	0–1,0
Гафний	0–2,0
Цирконий	0–1,0
Бор	0–0,05
Углерод	0–0,2
Рений	1,0–5,0
Рутений	0,1–5,0
Никель и примеси	остальное

При содержании в сплаве указанных концентраций хрома, алюминия и титана сплав обладает недостаточно высокой длительной прочностью при температурах выше 900°C.

В патенте [94] этой же фирмы предложен никелевый жаропрочный сплав, который может иметь поликристаллическую, направленно-кристаллизованную или монокристаллическую структуру и содержащий Co+Fe – до 20%, хрома 17–21%, что свидетельствует о невысоких рабочих температурах (до 700–800°C) лопаток из этого сплава.

После анализа патентов английской и французской компаний (Rolls-Royce plc. [95], ONERA [96, 97]) следует отметить, что по содержанию основных легирующих элементов (хром, алюминий, титан) разработанные этими фирмами сплавы предназначены для производства лопаток промышленных газовых турбин, работающих при невысоких рабочих температурах (до 700–800°C).

Наиболее интенсивные разработки по созданию высокожаропрочных поликристаллических никелевых сплавов равноосной кристаллизации, предназначенных для отливки турбинных лопаток, ведутся в США (NASA, GE Aircraft Engines, Cannon-Muskegon Corporation) и России

(ФГУП «ВИАМ»). Аналогичные разработки ведутся в Германии, Англии, Франции, Японии и Китае.

Основные усилия российских и зарубежных разработчиков направлены на повышение длительной прочности, пластичности, жаростойкости и коррозионной стойкости сплавов при одновременном снижении их плотности и стоимости. Это достигается благодаря сбалансированному соотношению легирующих элементов.

Заключение

Сравнительный анализ отечественного и зарубежного опыта создания жаропрочных никелевых сплавов для лопаток ГТД и тенденций развития разработок в данной области материаловедения позволяет сделать вывод о том, что применение новых отечественных разработок материалов и технологий позволяет создать российские конкурентоспособные двигатели, превосходящие по всем техническим и экономическим характеристикам двигатели зарубежного производства.

В результате проведенного анализа систем легирования жаропрочных никелевых сплавов с монокристаллической и поликристаллической структурами для создания литейных жаропрочных никелевых сплавов с низкой плотностью определены следующие направления повышения уровня основных характеристик сплавов:

– жаропрочности – путем легирования тугоплавкими элементами (молибден, вольфрам, рений, тантал);

– жаростойкости и коррозионной стойкости – благодаря повышению содержания хрома и титана, а также микролегированию редкоземельными элементами;

– пластичности – вследствие сбалансированного содержания карбидообразующих элементов (титан, тантал, гафний, хром, молибден, вольфрам);

– фазовой стабильности – путем сбалансированного содержания тугоплавких элементов (молибден, вольфрам, рений) и γ' -образующих (алюминий, титан, тантал).

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №8. С. 19–36.
3. Оспенникова О.Г. Стратегические направления создания новых жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения // *Цветная металлургия*. 2013. №1. С. 31–34.
4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2013. №3. С. 47–54.
5. Оспенникова О.Г. Перспективы развития жаропрочных литейных и деформируемых сплавов, защитных покрытий для деталей ГТД // *Новости материаловедения*. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №4. Ст. 01. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 13.10.2015).
6. 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.
7. Оспенникова О.Г. Стратегия развития в области разработки и использования жаропрочных сплавов и сталей в рамках Технологической платформы «Материалы и технологии металлургии» // *Цветная металлургия*. 2012. №6. С. 50–53.
8. Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Оспенникова О.Г. Литейные жаропрочные никелевые сплавы // *Все материалы*. Энциклопедический справочник. 2012. №5. С. 15–19.
9. Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Оспенникова О.Г. Литейные жаропрочные никелевые сплавы // *Все материалы*. Энциклопедический справочник. 2012. №6. С. 16–21.
10. 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.
11. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №8. С. 36–52.
12. 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.
13. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Литейные жаропрочные сплавы нового поколения / В сб.: 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ, 2007. С. 27–44.
14. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л. Компьютерное конструирование жаропрочного никелевого сплава IV поколения для монокристаллических лопаток газовых турбин / В кн.: Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина. М.: Наука, 2006. С. 98–115.
15. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технология, покрытия / под ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2006. 632 с.

16. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б. и др. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. М.: Машиностроение, 1997. 336 с.
17. 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.
18. 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.
19. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Василенок Л.Б., Морозова Г.И. Рений в жаропрочных никелевых сплавах для лопаток газовых турбин // Материаловедение. 2000. №2. С. 23–29.
20. Петрушин Н.В., Светлов И.Л. Физико-химические и структурные характеристики жаропрочных никелевых сплавов // Металлы. 2001. №2. С. 63–73.
21. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). М.: МИСиС, 2001. 632 с.
22. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Василенок Л.Б., Морозова Г.И. Рений в жаропрочных никелевых сплавах для лопаток газовых турбин (Продолжение) // Материаловедение. 2000. №3. С. 38–43.
23. Razumovskii I.M., Logunov A.V., Ruban A.V., Razumovskiy V.I., Johansson B., Larionov V.N., Ospennikova O.G., Poklad V.A. New generation of Ni-based superalloys designed on the basis of first-principles calculations // Materials Science and Engineering: A. 2008. V. 497. №1–2. P. 18–24.
24. Razumovskii I.M., Logunov A.V., Stroganov G.B., Ruban A.V., Razumovskii V.I., Larionov V.N., Ospennikova O.G., Poklad V.A. Theoretical analysis of the alloying system and design of new nickel-base superalloys // Doklady Physics. 2008. V. 53. №8. P. 438–441.
25. Логунов А.В., Разумовский И.М., Ларионов В.Н., Оспенникова О.Г., Поклад В.А., Рубан А.В., Разумовский В.И. Жаропрочные никелевые сплавы, получаемые методом монокристалльного литья, для деталей перспективных двигателей // Перспективные материалы. 2008. №2. С. 10–18.
26. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В. Компьютерный метод конструирования литейных жаропрочных никелевых сплавов / В сб.: Авиационные материалы и технологии. Вып.: Высокорениевые жаропрочные сплавы, технология и оборудование для производства сплавов и литья монокристаллических турбинных лопаток ГТД. М.: ВИАМ, 2004. С. 3–21.
27. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Сидоров В.В., Демонис И.М. Разработка монокристаллических высококорениевых жаропрочных никелевых сплавов методом компьютерного конструирования / В сб.: Авиационные материалы и технологии. Вып.: Высокорениевые жаропрочные сплавы, технология и оборудование для производства сплавов и литья монокристаллических турбинных лопаток ГТД. М.: ВИАМ, 2004. С. 22–36.
28. Морозова Г.И. Закономерность формирования химического состава γ/γ' -матрицы многокомпонентных никелевых сплавов // Доклады АН СССР. 1991. Т. 320. №6. С. 1413–1416.
29. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.10.2015).
30. Сплав на основе никеля: авт. св. 1157865 Рос. Федерация; опубл. 10.06.97.
31. Alloys having improved stress rupture properties: pat. 3254994 US; publ. 07.06.66.
32. Superalloys [Электронный ресурс]. URL: <http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2003/nickel.html> (дата обращения: 13.10.2015).
33. Литейный жаропрочный сплав на никелевой основе: пат. 2148100 Рос. Федерация; опубл. 18.01.99.
34. Литейный сплав на основе никеля: пат. 722330 Рос. Федерация; опубл. 30.11.94.
35. Сплав на основе никеля: пат. 1412342 Рос. Федерация; опубл. 30.11.94.
36. Жаропрочный литейный сплав на основе никеля и изделие, выполненное из него: пат. 2256715 Рос. Федерация; опубл. 20.07.05.
37. Жаропрочный сплав на основе никеля: пат. 2148099 Рос. Федерация; опубл. 27.04.00.
38. Монокристаллический сплав на основе никеля: пат. 1513934 Рос. Федерация; опубл. 10.04.95.
39. Монокристаллический сплав на основе никеля: пат. 1827121 Рос. Федерация; опубл. 09.07.95.
40. Способ производства литейных жаропрочных никелевых сплавов для получения отливок с направленной и монокристаллической структурой: пат. 2035521 Рос. Федерация; опубл. 20.05.95.
41. Устройство для получения монокристаллических отливок: пат. 2080209 Рос. Федерация; опубл. 27.05.97.
42. Устройство для получения отливки монокристаллической турбинной лопатки: пат. 2239520 Рос. Федерация; опубл. 10.11.04.
43. Способ повышения качества и эксплуатационной надежности лопаток турбины газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых сплавов: пат. 2184178 Рос. Федерация; опубл. 27.06.02.
44. Способ защиты поверхности лопатки: пат. 2252110 Рос. Федерация; опубл. 20.05.05.
45. Способ термической обработки отливки из жаропрочного монокристаллического никелевого сплава: пат. 2230821 Рос. Федерация; опубл. 20.06.04.
46. Single crystal alloy technology: pat. 4643782 US; publ. 17.02.87.
47. Superalloy for single crystal turbine vanes: pat. 02/070764 WO; publ. 12.09.02.
48. Superalloy for single crystal turbine vanes: pat. 2434920 CA; publ. 07.06.04.
49. Superalloy for single crystal turbine vanes: pat. 1382697 EP; publ. 21.01.04.
50. Single crystal nickel superalloy: pat. 4222794 US; publ. 19.06.80.
51. Advanced high strength single crystal superalloy compositions: pat. 1251059 CA; publ. 14.03.89.
52. Advanced high strength single crystal superalloy com-

- positions: pat. 4719080 US; publ. 12.01.88.
53. Heat treatment of single crystals: pat. 4583608 US; publ. 22.04.86.
54. Oxidation resistant single crystal superalloy castings: pat. 5540789 US; publ. 30.07.96.
55. Advanced high strength, highly oxidation resistant single crystal superalloy compositions having low chromium content: pat. 6007645 US; publ. 28.12.99.
56. Stable heat treatable nickel superalloy single crystal articles and compositions: pat. 6054096 US; publ. 25.04.00.
57. Clean single crystal nickel base superalloy: pat. 5549765 US; publ. 27.08.96.
58. Clean single crystal nickel base superalloy: pat. 0763604 EP; publ. 19.03.97.
59. Clean single crystal nickel base superalloy: pat. 5549765 US; publ. 27.08.96.
60. Process for producing elevated temperature corrosion resistant metal articles: pat. 4145481 US; publ. 20.03.79.
61. Modified advanced high strength single crystal superalloy composition: pat. US 7115175 B2; publ. 03.10.06.
62. Nickel-base superalloy: pat. 196240557 DE; publ. 18.12.97.
63. Water-insoluble azo colouring agents derived from N-acetoacetyldehydrothiolutidine: pat. 196240655 DE; publ. 25.09.97.
64. Monocrystalline nickel-base superalloy with Ti, Ta and Hf carbides: pat. 5759301 US; publ. 02.06.98.
65. Ni-Base Superalloy for single crystal: pat. 04131343 JP; publ. 06.05.92.
66. Nickel-base single-crystal superalloys, method of manufacturing same and gas turbine high temperature parts made thereof: pat. 1184473 EP; publ. 06.03.02.
67. Nickel-based single crystal superalloy: pat. 2404924 GB; publ. 16.02.05.
68. Ni-base directionally solidified superalloy and Ni-base single crystal superalloy: pat. 03/080882 WO; publ. 02.10.03.
69. Ni-base single crystal superalloy: pat. 2004/053177 WO; publ. 24.06.04.
70. Nickel-based single crystal alloy and a method of manufacturing the same: pat. 2002/0124915 US; publ. 12.09.02.
71. Nickel-base single crystal superalloy: pat. 2000129380 JP; publ. 09.05.00.
72. Литейный жаропрочный сплав на основе никеля: пат. 2070597 Рос. Федерация; опубл. 20.12.96.
73. Литейный жаропрочный сплав на никелевой основе: пат. 2148100 Рос. Федерация; опубл. 27.04.2000.
74. Литейный жаропрочный сплав на основе никеля: пат. 2153020 Рос. Федерация; опубл. 20.07.2000.
75. Жаропрочный сплав на основе никеля и изделие, выполненное из него: пат. 2215804 Рос. Федерация; опубл. 20.06.03.
76. Никелевый жаропрочный сплав для монокристаллического литья и изделие, выполненное из него: пат. 2293782 Рос. Федерация; опубл. 20.02.07.
77. Жаропрочный сплав на основе никеля для монокристаллического литья и изделие, выполненное из этого сплава: пат. 2369652 Рос. Федерация; опубл. 10.10.09.
78. Жаропрочный литейный сплав на основе никеля и изделие, выполненное из него: пат. 2365656 Рос. Федерация; опубл. 27.08.09.
79. Литейный жаропрочный сплав на основе никеля: пат. 2434069 Рос. Федерация; опубл. 20.11.11.
80. Жаропрочный сплав на основе никеля: пат. 2402624 Рос. Федерация; опубл. 27.10.10.
81. Жаропрочный сплав на никелевой основе для монокристаллического литья: пат. 2439184 Рос. Федерация; опубл. 10.01.12.
82. Жаропрочный литейный сплав на основе никеля: пат. 2383642 Рос. Федерация; опубл. 10.03.10.
83. Жаропрочный литейный сплав на основе никеля: пат. 2439185 Рос. Федерация; опубл. 10.01.12.
84. Литейный никелевый жаропрочный сплав: пат. 2446221 Рос. Федерация; опубл. 27.03.12.
85. Состав жаропрочного никелевого сплава (варианты): пат. 2353691 Рос. Федерация; опубл. 27.04.09.
86. Состав жаропрочного никелевого сплава для монокристаллического литья (варианты): пат. 2348724 Рос. Федерация; опубл. 10.03.09.
87. Состав жаропрочного никелевого сплава для монокристаллического литья (варианты): пат. 2348725 Рос. Федерация; опубл. 10.03.09.
88. Joint development of fourth generation single crystal superalloy // Superalloys-2004. Publication of the Minerals, Metals&Materials Society. 2004. P. 15-24.
89. A 5th generation Ni-base single crystal superalloy with superior elevated temperature properties // Proc. of 8th Liege Conf. Advanced materials for power engineering. 2006. P. 287-298.
90. New single crystal nickel superalloy, e.g. for aircraft turbine blades, has a specified composition providing low density, high creep resistance and good micro structural stability: pat. 2780983 FR; publ. 14.01.00.
91. Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок. Пер. с англ. / под ред. Ч.Т. Симса, Н.С. Столоффа, У.К. Хагеля. М.: Металлургия, 1995. Кн. 2. 383 с.
92. Nickel-base superalloy for high temperature, high strain application: pat. 6632299 US; publ. 14.10.03.
93. High temperature resistant part, made of single-crystal or polycrystalline nickel-base superalloy: pat. 1319729 EP; publ. 18.06.03.
94. Nickel base γ' superalloy with multiple reactive elements and use of said superalloy in complex material systems: pat. 2248923 EP; publ. 10.11.10.
95. Nickel alloy for turbine engine components: pat. 5897718 US; publ. 27.04.99.
96. Nickel-based superalloy for industrial turbine blades: pat. 2643085 FR; publ. 17.08.90.
97. Nickel based superalloy for single crystal turbine blades of industrial turbines having a high resistance to hot corrosion: pat. 1211336 EP; publ. 05.06.02.