

**ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**В.В. Сидоров, Д.Е. Каблов,  
Е.Б. Чабина, О.Г. Оспенникова,  
В.Н. Симонов, Ю.А. Пучков**

**ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ  
И МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ  
НА СТРУКТУРУ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ  
СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛОВ  
ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ**

Под общей редакцией  
академика РАН, профессора Е.Н. Каблова

Допущено Федеральным Учебно-методическим объединением  
по укрупненной группе специальностей и направлений  
22.00.00 «Технологии материалов» в качестве учебного пособия  
при подготовке магистров, обучающихся по направлению  
22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов»,  
и аспирантов, обучающихся по направлению  
22.06.01 «Технологии материалов»

МОСКВА  
ВИАМ  
2020

УДК 669.018.44:669.245

ББК 34.2

B58

Рецензенты: начальник сектора лаборатории ФГУП «ВИАМ», доктор технических наук *Ю.А. Бондаренко*; ведущий научный сотрудник ФГБУН ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, доктор технических наук *В.Т. Бурцев*

**Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Чабина Е.Б., Оспенникова О.Г., Симонов В.Н., Пучков Ю.А.**

B58 Влияние примесей и микролегирования на структуру и эксплуатационные свойства монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов: учебное пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. – М.: ВИАМ, 2020. – 336 с. : ил.

ISBN 978-5-905217-57-9

В учебном пособии обобщены результаты научно-исследовательских работ, проведенных совместно сотрудниками ВИАМ и МГТУ им. Н.Э. Баумана. Особое внимание уделено влиянию примесных элементов и специальных микролегирующих добавок щелочноземельных и редкоземельных элементов на технологические и эксплуатационные свойства монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов.

Представленные результаты исследований будут полезны широкому кругу специалистов в области металлургии и материаловедения жаропрочных никелевых сплавов, работникам металлургических и моторостроительных предприятий, а также аспирантам и студентам соответствующих специальностей.

УДК 669.018.44:669.245

ББК 34.2

ISBN 978-5-905217-57-9

© ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, 2020

# ОГЛАВЛЕНИЕ

От издателя .....	7
Предисловие .....	10
Введение .....	12
<b>Глава 1. Примеси и микролегирующие добавки в монокристаллических жаропрочных никелевых сплавах (литературный обзор) .....</b>	<b>16</b>
1.1. Легирующие и примесные элементы в монокристаллических жаропрочных никелевых сплавах ...	16
1.2. Пути обеспечения качества, служебных и экономических показателей деталей из монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов .....	32
1.3. Влияние примесей на структуру и свойства монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов ....	38
1.3.1. Влияние газов (O, N, H) и углерода .....	43
1.3.2. Влияние неметаллических примесей (S, P) .....	52
1.3.3. Влияние металлических и металлоидных примесей (Na, K, Zn, Cd, Tl, Sn, Pb, Bi, Si, Sb, As, Se, Te) .....	59
1.4. Влияние микролегирующих добавок щелочноземельных и редкоземельных металлов на структуру и свойства монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов ....	65
1.5. Основные дефекты структуры монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов .....	79
<b>Выводы по главе .....</b>	<b>82</b>
<b>Литература .....</b>	<b>85</b>
<b>Вопросы к главе .....</b>	<b>95</b>
<b>Глава 2. Теоретические основы обеспечения высокого качества монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов ....</b>	<b>98</b>
2.1. Выбор рафинирующих и микролегирующих добавок к монокристаллическим жаропрочным никелевым сплавам .	98
2.2. Термодинамический анализ поведения примесей углерода, кислорода, серы, фосфора, кремния, свинца; термодинамика и кинетика их удаления из расплава .....	108

2.3. Диффузия примесей и рафинирующих добавок и их влияние на кинетику структурных и фазовых превращений при температурах эксплуатации .....	123
<b>Выводы по главе</b> .....	135
<b>Литература</b> .....	139
<b>Вопросы к главе</b> .....	143
<b>Глава 3. Технологические основы обеспечения высокого качества монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов</b> ..	145
3.1. Требования по ограничению содержания примесей в монокристаллических жаропрочных никелевых сплавах .....	145
3.2. Исследование закономерностей распределения примесей в монокристаллах жаропрочных никелевых сплавов и их поведение в процессе плавки .....	150
3.3. Экспериментальные исследования по рафинированию никелевого расплава от азота .....	159
3.4. Результаты исследования влияния микролегирования РЗМ на содержание примесей и выход годных монокристаллов .....	162
3.5. Рафинирование сплавов от примеси кремния и фосфора путем направленной кристаллизации расплава при малых скоростях перемещения фронта кристаллизации .....	171
3.6. Влияние кратности переплава в вакууме на химический состав и свойства монокристаллов .....	178
3.7. Поведение редкоземельных металлов при плавке в вакууме и направленной кристаллизации жаропрочных никелевых сплавов .....	182
<b>Выводы по главе</b> .....	190
<b>Литература</b> .....	194
<b>Вопросы к главе</b> .....	197
<b>Глава 4. Влияние примесей и микролегирующих добавок на служебные характеристики монокристаллов жаропрочных сплавов</b> .....	199
4.1. Влияние примесей и микролегирования на свойства монокристаллов при растяжении .....	199

4.2. Влияние примесей и микролегирования на длительную прочность монокристаллов и высокотемпературную ползучесть .....	205
4.3. Влияние примесей и микролегирования на малоцикловую усталость монокристаллов .....	219
4.4. Влияние примесей и микролегирования на циклическую жаростойкость монокристаллов .....	225
4.5. Влияние редкоземельных элементов на стойкость монокристаллов к хлоридной коррозии .....	238
<b>Выводы по главе</b> .....	244
<b>Литература</b> .....	249
<b>Вопросы к главе</b> .....	251
<b>Глава 5. Влияние примесей и микролегирования на структуру безуглеродистого монокристаллического жаропрочного никелевого сплава</b> .....	253
5.1. Изменение структуры безуглеродистого монокристаллического жаропрочного никелевого сплава паспортного состава при производстве и после механических испытаний .....	258
5.2. Влияние примесей серы, фосфора, свинца, углерода, кислорода и азота на структурно-фазовое состояние безуглеродистого монокристаллического жаропрочного никелевого сплава .....	265
5.2.1. Количественная оценка геометрических параметров микроструктур безуглеродистого монокристаллического жаропрочного никелевого сплава .....	265
5.2.2. Качественная оценка микроструктуры и фрактографическое исследование изломов после механических испытаний .....	272
5.3. Влияние микролегирования лантаном на изменения структурно-фазового состояния безуглеродистого монокристаллического жаропрочного никелевого сплава с примесями .....	286
5.4. Исследование межфазных границ $\gamma/\gamma'$ безуглеродистого монокристаллического жаропрочного никелевого сплава, содержащего примеси, высокоразрешающими методами	

просвечивающей электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа . . . . .	296
5.4.1. Распределение примесей в структуре безуглеродистого монокристаллического жаропрочного никелевого сплава: фазы и внутренние поверхности раздела . . . . .	296
5.4.2. Влияние микролегирования лантаном на распределение примесей в структуре . . . . .	300
<b>Выводы по главе . . . . .</b>	<b>300</b>
<b>Литература . . . . .</b>	<b>305</b>
<b>Вопросы к главе . . . . .</b>	<b>309</b>
<b>Глава 6. Исследование процесса фильтрации расплава жаропрочных никелевых сплавов . . . . .</b>	<b>311</b>
6.1. Исследование строения фильтра и особенностей фильтрации примесей пористой керамикой из оксида алюминия . . . . .	311
6.1.1. Механизм и особенности фильтрации фаз при протекании расплава сплава ЖС36 через пенокерамику . . . . .	311
6.1.2. Анализ фильтрации примесей пористой керамикой из оксида алюминия . . . . .	316
<b>Выводы по главе . . . . .</b>	<b>324</b>
<b>Литература . . . . .</b>	<b>326</b>
<b>Вопросы к главе . . . . .</b>	<b>328</b>
<b>Заключение . . . . .</b>	<b>329</b>
<b>Условные обозначения . . . . .</b>	<b>334</b>

*Учебное издание*

**Сидоров Виктор Васильевич  
Каблов Дмитрий Евгеньевич  
Чабина Елена Борисовна  
Оспенникова Ольга Геннадиевна  
Симонов Виктор Николаевич  
Пучков Юрий Александрович**

**ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ И МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ  
НА СТРУКТУРУ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА  
МОНОКРИСТАЛЛОВ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ**

Ответственная за выпуск – Е.А. Ватулян  
Выпускающий редактор – О.В. Федина  
Редактор – Е.А. Аграфенина  
Корректоры – И.С. Туманова, Ю.В. Коломиец  
Компьютерный набор – М.В. Савина  
Подготовка иллюстраций – М.С. Закржевская  
Дизайн обложки – Е.А. Цилин  
Верстка – ООО «ЭйПиСиПублишинг»

ФГУП «ВИАМ», 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17  
Тел.: +7 (499) 261-86-77  
Факс: +7 (499) 267-86-09  
Электронная почта: [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)  
Сайт: [www.viam.ru](http://www.viam.ru)

Отпечатано в ООО «ЭйПиСиПублишинг»  
127550, г. Москва, ул. Онежская, д. 24, оф. 7

Подписано в печать 27.03.2020  
Формат 60×84/16  
Объем 19,53 усл. п. л. Тираж 750 экз.

