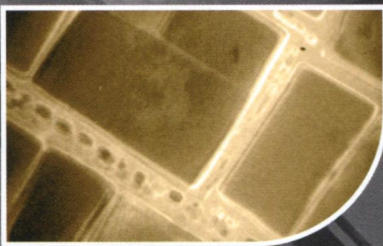
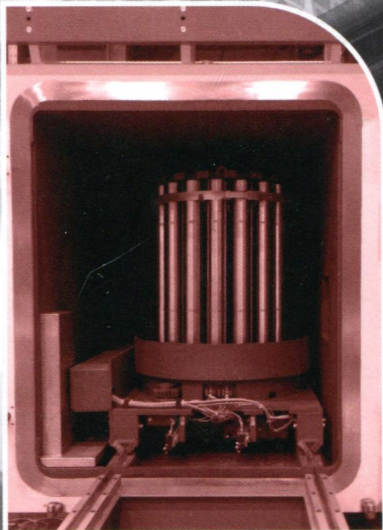


В.В. СИДОРОВ, Д.Е. КАБЛОВ,
Е.Б. ЧАБИНА, О.Г. ОСПЕННИКОВА,
В.Н. СИМОНОВ, Ю.А. ПУЧКОВ



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

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

**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
Глава 1. Примеси и микролегирующие добавки в монокристаллических жаропрочных никелевых сплавах (литературный обзор)	16
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
Выводы по главе	82
Литература	85
Вопросы к главе	95
Глава 2. Теоретические основы обеспечения высокого качества монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов ...	98
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
Выводы по главе	135
Литература	139
Вопросы к главе	143
Глава 3. Технологические основы обеспечения высокого качества монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов . . .	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
Выводы по главе	190
Литература	194
Вопросы к главе	197
Глава 4. Влияние примесей и микролегирующих добавок на служебные характеристики монокристаллов жаропрочных сплавов	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
Выводы по главе	244
Литература	249
Вопросы к главе	251
Глава 5. Влияние примесей и микролегирования на структуру безуглеродистого монокристаллического жаропрочного никелевого сплава.	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 γ/γ' 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
Выводы по главе	300
Литература	305
Вопросы к главе	309
Глава 6. Исследование процесса фильтрации расплава жаропрочных никелевых сплавов	311
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
Выводы по главе	324
Литература	326
Вопросы к главе	328
Заключение	329
Условные обозначения	334