

**Е.Е. Барышев, А.Г. Тягунов, Н.Н. Степанова**

**Влияние структуры расплава  
на свойства жаропрочных  
никелевых сплавов  
в твердом состоянии**

Российская академия наук · Уральское отделение  
Институт физики металлов

Е.Е. Барышев, А.Г. Тягунов, Н.Н. Степанова

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ РАСПЛАВА  
НА СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНЫХ  
НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ  
В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ**

Екатеринбург  
2010

УДК 669.01  
ББК 34.23+34.25  
Б 26

Ответственный редактор доктор технических наук **Ю.Г. Векслер**

Рецензент доктор технических наук **И.Г. Бродова**

**Б 26 Барышев Е.Е., Тягунов А.Г., Степанова Н.Н.**

Влияние структуры расплава на свойства жаропрочных никелевых сплавов в твердом состоянии. УрО РАН– Екатеринбург, 2010.

Приведены результаты изучения структуры и свойств жаропрочных никелевых композиций в жидком состоянии, определены особенности структурных изменений расплавов и рассмотрено их влияние на образование литых структур. На основе проведенных исследований предложена методика разработки режимов теплового воздействия на расплав и проанализированы результаты опытного и промышленного применения технологии ВТОР на структуру и свойства поликристаллических и монокристаллических изделий из жаропрочных никелевых сплавов. Кроме того, представлены результаты исследований влияния введения в расплав тугоплавких дисперсных соединений и оценено совместное влияние ВТОР и ТДС на структуру и свойства жаропрочных сплавов на основе никеля.

Издание предназначено для специалистов предприятий машиностроения, а также для студентов высших учебных заведений.

УДК 669.01  
ББК 34.23+34.25

ISBN 978-5-7691-2123-4

© Институт физики металлов  
УрО РАН, 2010  
© Барышев Е.Е., Тягунов А.Г.,  
Степанова Н.Н., 2010

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА .....	5
1.1. Условия работы и требования, предъявляемые к жаропрочным сплавам на основе никеля .....	5
1.2. Структура и свойства жаропрочных сплавов на никелевой основе.....	6
1.2.1. Влияние легирующих элементов.....	6
1.2.2. Кристаллизация сплавов на основе никеля .....	7
1.2.3. Структурные составляющие жаропрочных сплавов и их влияние на свойства материала .....	8
1.3. Термическая обработка жаропрочных сплавов, термическая стабильность их структуры.....	10
1.4. Современные представления о строении металлических расплавов ..	13
1.4.1. Неравновесные расплавы .....	14
1.4.2. Явление гистерезиса свойств.....	17
1.4.3. Равновесные расплавы .....	19
1.4.4. Квазикристаллизм .....	21
1.4.5. Квазихимический вариант модели микронеоднородного строения расплавов .....	25
1.4.6. О процессе релаксации неравновесных металлических расплавов... ..	26
1.5. Связь между свойствами жидких и твердых сплавов .....	28
1.6. Термовременная обработка расплава как способ повышения качества металлопродукции .....	31
ГЛАВА 2. СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ В ЖИДКОМ СОСТОЯНИИ.....	35
2.1. Температурные зависимости удельного электросопротивления, кинематической вязкости, плотности жаропрочных никелевых сплавов в жидком состоянии.....	35
2.2. Влияние температуры максимального нагрева расплава на политермы удельного электросопротивления жаропрочных никелевых сплавов.....	36
2.3. Политермы кинематической вязкости.....	38
2.4. Влияние способа выплавки на характер политермы электросопротивления сплава ЖС26ВИ в жидком состоянии .....	40
2.5. Влияние изотермических выдержек на политермы удельного электросопротивления.....	42
2.6. Зависимость электросопротивления жидких жаропрочных сплавов от количества фазовых составляющих твердых структур .....	44
2.7. Температурная зависимость электросопротивления для Ni <sub>3</sub> Al.....	46
2.8. Влияние содержания углерода.....	53
2.9. Влияние тугоплавких дисперсных соединений (ТДС) на характер политерм удельного электросопротивления сплава ЖС6У .....	55



2.10. Развитие представлений о микронеоднородном строении жидких жаропрочных сплавов.....	57
2.10.1. Характер микронеоднородности сложнолегированных никелевых расплавов .....	57
2.10.2. Модель строения жидких жаропрочных никелевых сплавов ....	59
ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ ПОДГОТОВКИ РАСПЛАВА НА КРИСТАЛЛИЗАЦИЮ И СТРУКТУРУ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ В ЛИТОМ СОСТОЯНИИ .....	61
3.1. Анализ влияния условий выплавки на кристаллизацию жаропрочных сплавов ЖС36 и ЖС6У .....	61
3.2. Зависимость структуры жаропрочных сплавов ЖС36, ЖС6У и ЭП539Л от режима их выплавки .....	64
3.3. Изучение влияния на структуру литого металла добавок ТДС в жидкий сплав ЖС6У .....	74
3.4. Влияние состояния расплава на кристаллизацию .....	80
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ ВТОР ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ, ВЫПЛАВЛЕННЫХ В РЕЖИМЕ ВТОР.....	84
4.1. Разработка температурно-временного режима выплавки сплава ЖСЗДКВИ.....	84
4.2. Совершенствование процесса модифицирования сплава ЖСЗДКВИ частицами нитрида карбонитрида титана .....	90
4.2.1. Анализ причин, сдерживающих промышленное освоение процесса модифицирования тугоплавкими дисперсными частицами.	90
4.2.2. Разработка процесса модифицирования сплава ЖСЗДКВИ.....	92
4.3. Совершенствование температурно-временного режима выплавки сплава ЖС6УВИ.....	100
ГЛАВА 5. СПЛАВЫ С МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ Ж26ВИ, ЖС32ВИ, ЖС36.....	105
5.1. Влияние условий выплавки на структуру монокристаллов сплавов ЖС26ВИ, ЖС32ВИ .....	105
5.2. Применение методов высокотемпературной рентгенографии для определения стабильности фазового состава жаропрочных сплавов в условиях нагрева.....	112
5.3. Разделение отражений от $\gamma$ - и $\gamma'$ -фаз в составе суммарного $\gamma + \gamma'$ -пика .	115
5.4. Теплофизические свойства сплава ЖС26 .....	119
5.5. Влияние ВТОР на структуру и механические свойства сплавов ЖС26 и ЖС32.	120
5.6. Влияние условий выплавки и режима термообработки на длительную прочность сплава ЖС32 при рабочих температурах .....	125
5.7. Разработка режима термообработки для сплава ЖС26.....	133
5.8. Анализ влияния неконтролируемых примесей .....	134
5.8.1. Изучение влияния условий плавки на содержание кислорода и азота.	136

5.8.2. Результаты фракционного анализа кислорода .....	138
5.9. Влияние условий кристаллизации на совершенство кристаллического строения и однородность ростовой структуры монокристалльных отливок из сплава ЖС36, закристаллизованных с применением ВТОР .....	141
<b>ГЛАВА 6. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ОТЛИВОК С МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ ИЗ СПЛАВА ЖС32, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ВВЕДЕНИИ В РАСПЛАВ ПОРОШКОВ ТУГОПЛАВКИХ ДИСПЕРСНЫХ СОЕДИНЕНИЙ .....</b>	
6.1. Контактное взаимодействие легированных карбонитридов титана с расплавами на основе никеля .....	148
6.2. Влияние предварительной ВТОР на структуру монокристаллов из сплава ЖС32, закристаллизованных при введении в расплав ТДС .....	150
6.3. Выбор оптимальной температуры заливки монокристаллического жаропрочного сплава ЖС32 .....	153
6.4. Выбор металла-активатора при введении ТДС в расплав при получении монокристаллической отливки из сплава ЖС32 .....	154
6.5. Технологические параметры введения дисперсного порошка карбонитрида титана в расплав никелевого сплава .....	158
6.5.1. Влияние введения карбонитрида титана на состав карбидной фазы .....	158
6.5.2. Влияние температуры спекания (режима ТФА) на структуру монокристалла сплава ЖС32 .....	160
6.5.3. Определение оптимальной концентрации ТДС при получении монокристалла сплава ЖС32 .....	161
6.5.4. Длительность выдержки расплава при температуре введения ТДС-добавки .....	164
6.5.5. Влияние скорости кристаллизации в условиях введения ТДС в расплав на ростовую структуру монокристаллов различной кристаллографической ориентации .....	164
6.5.6. Оценка однородности структуры по длине монокристалльного изделия из сплава ЖС32, выращенного с введением ТДС .....	169
6.6. Структура монокристаллов <001> безуглеродистого сплава ЖС32, полученных при введении в расплав ТДС .....	173
6.7. Механические свойства сплавов ЖС32 с различным содержанием углерода при введении в расплав ТДС .....	174
6.8. Факторы, влияющие на термическую стабильность монокристаллов сплава ЖС32 при введении в расплав ТДС .....	175
6.9. Изучение влияния повторного переплава сплава ЖС32 при введении в его расплав ТДС .....	179
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>182</b>