

# **ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ**

## **МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ**

**«Физическая мезомеханика.  
Материалы с многоуровневой иерархически  
организованной структурой и интеллектуальные  
производственные технологии»,**

посвященная 90-летию со дня рождения  
основателя и первого директора ИФПМ СО РАН  
**академика Виктора Евгеньевича Панина**

в рамках  
**Международного междисциплинарного симпозиума  
«Иерархические материалы: разработка и приложения  
для новых технологий и надежных конструкций»**

**5–9 октября 2020 года  
Томск, Россия**

Томск  
Издательство ТГУ  
2020

**ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА ЭВОЛЮЦИЮ ФАЗОВОГО СОСТАВА СПЛАВА НА ОСНОВЕ Ni - Al- Cr, ЛЕГИРОВАННОГО РЕНИЕМ И ЛАНТАНОМ**

Никоненко Е.Л., Попова Н.А., Конева Н.А.

*Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск*

Одним из перспективных направлений в создании и применении металлических материалов, обладающих необходимыми служебными свойствами, является создание сплавов, содержащих интерметаллидные фазы. Примером являются суперсплавы на основе смеси  $\gamma'$ - и  $\gamma$ -фаз, в которых  $\gamma$ -фаза представляет собой неупорядоченный ГЦК-твердый раствор на основе, в частности, никеля и алюминия, а  $\gamma'$ -фаза (в этом случае фаза  $Ni_3Al$ ) – упорядоченную фазу со сверхструктурой  $L1_2$  [1-3]. В реальных суперсплавах на никелевой основе, состав которых является многокомпонентным, наряду с Ni и Al, имеются атомы других элементов, таких как Ti, Cr, Co, Mo, W, Ta, Nb, Hf. В последние годы для легирования суперсплавов используются еще Re, Ru, La. Фазовый состав таких суперсплавов и локализация фаз, образующихся этими элементами, изучены мало. Исследованию этого вопроса и посвящена настоящая работа.

Целью работы являлось качественные и количественные исследования структуры, фазового состава, морфологии фаз сложнолегированного высококремнистого сплава, дополнительно легированного La. Основные элементы сплава: Ni – ~70 ат.%, Al – ~17 ат.% и Cr – ~5 ат.%. Легирующими элементами были Mo, W, Ta, Ti, Co, Co с суммарным количеством ~7 ат.%, Re – 0,4 ат.% и La – 0,006 ат.%. В работе был использован метод просвечивающей дифракционной электронной микроскопии (ПЭМ). Сплав был получен методом направленной кристаллизации (НК). Исследование структуры сплава проводилось в двух состояниях: 1) исходное состояние – после НК; и 2) после двухступенчатого отжига: при температуре 1150°C в течение 1 часа и при температуре 1100 С в течение 480 часов. Исследуемый сплав обладал монокристаллической структурой (ориентация [001]).

Наблюдаемые методом ПЭМ в суперсплаве фазы можно классифицировать на основные и вторичные. Эта классификация основывается на объемной доле фаз, их роли в сплаве. Как видно из табл.1, основными фазами являются  $\gamma'$ - и  $\gamma$ -фазы. В исследуемом сплаве они присутствуют в виде кубовидов  $\gamma'$ -фазы, разделенных прослойками  $\gamma$ -фазы. Остальные фазы являются вторичными. Объемные доли всех присутствующих фаз в сплаве также приведены в табл.1.

Таблица 1. Фазовый состав сплава и количественные характеристики фаз

Фазы	Пространственная группа	Параметр кристаллической решетки, нм	Объемная доля фаз, %	
			Исходный	Отожженный
$\gamma'$	$Pm\bar{3}m$ (куб)	$a = 0.3568-0.3575$	85.6	90.0
$\gamma$	$Fm\bar{3}m$ (куб)	$a = 0.3569$	8	9
$\beta$	$Pm\bar{3}m$ (куб)	$a = 0.288$	5	0
$\chi$	$I\bar{4}3m$ (куб)	$a = 0.957-0.960$	1.4	0
$\sigma$	$P4_2/mnm$ (тетр.)	$a = 0.910-0.960$ $c = 0.475-0.499$	0	1

Рассмотрим превращения исходного состояния сплава после высокотемпературных отжигов. Сравним фазовый состав и объемную долю фаз этих двух состояний (табл.1). Превращение происходит в прослойках  $\gamma$ -фазы несовершенной части структуры, внутри  $\gamma'$ -кубовидов той же части структуры и в свободном пространстве между участками с квазикубоидами. Часть зоны нарушенных кубовидов и  $\beta$ -фаза превращаются в идеальную зону кубовидов. Происходит превращение  $[(\gamma'+\gamma)$  частично +  $(\beta+\gamma)$  полностью]  $\rightarrow (\gamma+\gamma'+\sigma)$ . Объемная доля  $\gamma$ -фазы в основном сохраняется, а  $\gamma'$ -фазы – даже несколько увеличивается. По-видимому, это происходит за счет распада  $\beta$ -фазы. Часть атомов Al при этом переходит в

#### **Секция 4. Научные основы разработки материалов с многофазной иерархически организованной структурой, в том числе для экстремальных условий эксплуатации**

$\sigma$ -фазу. Атомы Re из  $\beta$ -фазы также переходят в  $\sigma$ -фазу. Из  $\chi$ -фазы атомы Re, Co, Mo, W и Al уходят на формирование  $\sigma$ -фазы. Туда же добавляются атомы Cr. Диаграммы равновесия Re с Mo, W и другими элементами показывают, что при близкой объемной доле  $\sigma$ - и  $\chi$ -фаз реакция носит квазиравновесный характер, а часть элементов из  $\beta$ -фазы также оказываются в  $\sigma$ -фазе.

Установлено, что отжиг при введении лантана и рения изменяет фазовый состав сплава. Частицы вторичных фаз локализованы в отдельных участках сплава и расположены с определенной периодичностью. Образование вторичных тугоплавких фаз и их периодическое распределение в структуре способствуют упрочнению суперсплава.

1. Жаропрочные стали и сплавы. / Буклет ВИАМ, 2012 . - 60 с.

2. Ross E. W., Sims C. T. Nickel-Base Alloys, Superalloys II – High temperature materials for aerospace and industrial power монография - NY: John Wiley & Sons, Inc.,1987. – P. 97-133.

3. Симс Ч.Т., Столофф Н.С., Хагель В.Ц. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок. Ч.1 – М.: Металлургия, 1995.–384 с.