

**СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ СУПЕРСПЛАВА НА ОСНОВЕ Ni-Al-Cr,  
ЛЕГИРОВАННОГО Re и La**

Е.Л. Никоненко<sup>1,2</sup>, Е.Е. Цедрик<sup>1</sup>, Н.А. Попова<sup>1</sup>

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. Н.А. Конева

<sup>1</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет,

Россия, г. Томск, пл. Соляная, 2, 634003

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пл. Ленина 30, 634050

E-mail: [vilatomsk@mail.ru](mailto:vilatomsk@mail.ru)

**STRUCTURA AND PHASE COMPOSITION OF THE SUPERALLOY ON BASE  
OF Ni-Al-Cr ALLOYED BY Re AND La**

E.L. Nikonenko<sup>1,2</sup>, E.E.Tsedrik<sup>1</sup>, N.A. Popova<sup>1</sup>

Scientific Supervisor: Prof., Dr. N.A. Koneva

<sup>1</sup>Tomsk State University of Architecture and Building, Russia, Tomsk

<sup>2</sup>Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: [vilatomsk@mail.ru](mailto:vilatomsk@mail.ru)

***Annotation.** Qualitative and quantitative studies of the structure, phase composition, morphology of phase of the high-rhenium alloys additionally doped with La were carried out by TEM and SEM methods. The alloy was obtained by directional solidification method. It was shown that introduction of Re and La to an alloy leads to formation of new phases:  $\beta$  and  $\chi$ , which bring serious irregularities in the structure of quasicuboids of  $\gamma$ -phase.*

**Введение.** Уровень требований к материалам, обладающим необходимыми эксплуатационными свойствами, постоянно растет. Одним из перспективных направлений поиска новых высокотемпературных материалов является создание сплавов, содержащих интерметаллидные фазы. Примером являются суперсплавы на основе  $(\gamma+\gamma')$ -фаз, в которых  $\gamma$ -фаза представляет собой неупорядоченный твердый раствор с ГЦК-структурой, а  $\gamma'$ -упорядоченная фаза со сверхструктурой  $L1_2$ . В настоящее время суперсплавы создаются часто на основе сплава Ni-Al, легированного различными элементами.

**Материал и методы исследования.** Целью работы являлось качественные и количественные исследования структуры, фазового состава, морфологии фаз сложнолегированного высокорениевого сплава, дополнительно легированного La. Сплав был получен методом направленной кристаллизации. Основные элементы сплава: Ni – ~70 ат.%, Al – ~17 ат.% и Cr – ~5 ат.%. Основными 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 было использовано два метода исследования: 1) метод просвечивающей дифракционной электронной микроскопии (ПЭМ) и 2) метод растровой электронной микроскопии (РЭМ).

**Результаты и их обсуждение.** Наблюдаемые 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. Как правило, они формируют основную структуру сплава практически во всех суперсплавах. В исследуемом сплаве они присутствуют в виде квазикубидов  $\gamma'$ -фазы, разделенных прослойками  $\gamma$ -фазы. Остальные фазы являются вторичными. Объемные доли всех присутствующих фаз в сплаве также приведены в табл.1. Из таблицы хорошо видно, что объемная доля  $\gamma'$ -фазы высокая. Следующая по величине – объемная доля  $\gamma$ -фазы. Далее –  $\beta$ -фаза (табл.1). Под этим символом здесь определена фаза  $\beta$ -NiAl с параметром кристаллической решетки  $a = 0,288$  нм, имеющая структуру CsCl, она может превращаться в тетрагональную фазу типа L1<sub>0</sub>. Следующая фаза –  $\chi$  (табл.1) относится к топологически плотноупакованным фазам, или по-другому, к фазам Франка-Каспера. Ее появление обязано присутствию в сплаве Re. Действительно, взаимодействие Re с Mo и W а также с Co и Al приводит к появлению  $\chi$ -фазы. Эта фаза образуется при отпуске.

Таблица 1

Фазовый состав сплава и количественные характеристики фаз

Фазы	Тип кристаллической решетки	Пространственная группа	Параметр кристаллической решетки, нм	Объемная доля фаз, $\pm 1\%$
$\gamma'$	Кубич.	Pm3m	$a = 0,3568-0,3575$	85,60
$\gamma$	Кубич.	Fm3m	$a = 0,3569$	8,00
$\beta$	Кубич.	Pm $\bar{3}$ m	$a = 0,288$	5,00
$\chi$	Кубич.	I $\bar{4}$ 3m	$a = 0,957-0,960$	1,40

Известно, что структура суперсплавов, прежде всего, выражена смесью ( $\gamma+\gamma'$ )-фаз. Эта смесь имеет морфологически правильную кристаллографическую ориентацию и формирует квазиоднокристаллическую структуру. Присутствие в сплаве активных фазообразующих металлов усложняет структуру суперсплава и вызывает появление в нем участков с нарушенной структурой квазикубидов  $\gamma'$ -фазы. В исследуемом сплаве к фазообразующим металлам относятся, прежде всего, Re и La. Присутствию этих элементов обязано формирование части  $\beta$ -фазы и формирование  $\chi$ -фазы – полностью. Образование этих двух фаз вносит серьезное нарушение в структуру квазикубидов  $\gamma/\gamma'$ . Поскольку Re и La не заполняют однородно весь объем сплава, а присутствуют лишь в локальных участках, то в сплаве нарушенным оказалась лишь часть объема квазикубидов.

Таблица 2

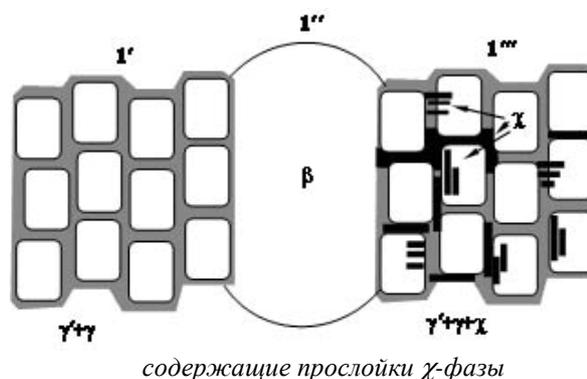
Структурно-фазовые состояния исследуемого сплава

Наименование состояний	Объемная доля состояний	Фазовый состав	Размер квазикубидов, нм	Размер частиц $\chi$ -фазы, нм
1'	0.65	$\gamma+\gamma'$	320 × 440	нет
1''	0.05	$\beta$	нет	нет
1'''	0.30	$\gamma+\gamma'+\chi$	320 × 440	30 × 240

Выполненные исследования позволили представить схему исследуемого образца сплава. Она представлена на рис.1. На нем четко видны три различных морфологически-фазовых состояния: 1', 1'' и 1'''. Они отражены также в табл.2. Из схемы рис.1 хорошо видно, что состояние 1' представляет собой идеальную структуру ( $\gamma+\gamma'$ ) со слегка анизотропным искажением. Состояние 1''' наряду с квазикубидами содержит прослойки  $\chi$ -фазы. Они могут быть локализованы как в  $\gamma'$ -, так и в  $\gamma$ -фазе. Ориентация этих прослоек параллельна кубическим направлениям  $\gamma'$ - и  $\gamma$ -фаз, как и ориентация

прослойки  $\gamma$ -фазы, ее объемная доля близка к 5%. В состоянии  $1'''$  квазикубоиды так же анизотропны. Состояние  $1''$  отличается полностью разрушенной структурой квазикубоидов, их просто там нет. Объем участка  $1''$  полностью занимает, трехкомпонентный раствор  $\text{NiAl}_2\text{Re}$  – химическая формула трехкомпонентной  $\beta$ -фазы.

Рис.1. Схематическое изображение структуры сплава. Три морфологически-фазовые состояния:  $1'$  – идеальная структура квазикубоидов ( $\gamma + \gamma$ );  $1''$  – участок  $\beta$ -фазы;  $1'''$  – квазикубоиды ( $\gamma + \gamma$ ),



Наблюдается параллельность прослоек  $\gamma'$ -фазы и прослоек  $\chi$ -фазы. Обе фазы обладают кубической кристаллической решеткой, однако размерные эффекты вынуждают их иметь некоторую кристаллографическую разориентировку. Рассмотрим теперь контакт  $\beta$ -фазы и массивного блока  $\gamma/\gamma'$ -фаз. Исследования показали, что граница раздела этого блока и  $\beta$ -фазы проходит по направлению  $[011]$   $\gamma'$ -фазы. Химическая формула  $\beta$ -фазы находится вблизи состава  $\text{NiAl}_2\text{Re}$ . Изображение структуры сплава, полученное методом РЭМ, представлено на рис.2. Большую часть объема сплава представляют квазикубоиды, целые и нарушенные, контраст от которых из-за относительно небольшого увеличения не отличается. Расслоение по Re хорошо видно благодаря выделению  $\beta$ -фазы, которая преимущественно стабилизируется этим химическим элементом. Частицы  $\beta$ -фазы хорошо видны на рис.2.

**Закключение.** Таким образом, исследования морфологии и фазового состава сплава, показали, что 95% его объема составляют квазикубоиды  $\gamma/\gamma'$ -фаз, при этом 65% – идеальные квазикубоиды и 30% – квазикубоиды, содержащие прослойки  $\chi$ -фазы. Наконец, 5% объема занимает  $\beta$ -фаза, основу которой

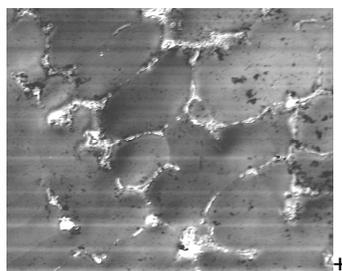


Рис.2. Изображение структуры сплава, полученное методом РЭМ. Черными стрелками отмечены частицы  $\beta$ -фазы

представляет ОЦК упорядоченная трехкомпонентная фаза  $\text{NiAl}_2\text{Re}$ .

*Работа выполнена в рамках гос. задания Минобрнауки России № 3.295.2014/К и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-02-92605 КО\_а.*