

**ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СТРУКТУРУ НИКЕЛЕВОГО
СПЛАВА***^{1,2} А.В. Никоненко, ¹Н.А. Попова, ¹Е.Л. Никоненко

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

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет,

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

²Национальный исследовательский Томский государственный университет,

Россия, Томск, пр. Ленина, 36, 634050,

E-mail: vilatomsk@mail.ru**HIGH-TEMPERATURE EFFECT ON STRUCTURE OF NI-BASED ALLOY**^{1,2} A.V. Nikonenko, ¹N.A. Popova, ¹E.L. Nikonenko

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

¹Tomsk State University of Architecture and Building, Russia, Tomsk, Soljanaja str. 2, 634003²National Research Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin str., 36, 634050,E-mail: vilatomsk@mail.ru

Abstract. The paper presents the transmission electron microscope investigations of the heat-resisting Ni–Al alloy structure modified by different elements, in particular, rhenium and ruthenium in the amount of ~4 at.%. The alloy is investigated after 1000°C annealing during 118 and 372 h. Investigations show that independent from the annealing duration, the main phases in the alloy are γ and γ' -phases. The increase in the annealing time results in the destruction of the cuboidal structure of material. The process of phase recrystallization occurring at a time, is accompanied by the formation of new phases, namely δ -phase (Al_3Ta_3Ru), Laves phase ($Ta_3Ni_2Cr_2Co$) and σ -phase $(Ni,Co,Al,Re)_x(Cr,Mo,Ta,W)_y$.

Введение. Одним из перспективных направлений в успешном развитии современной техники является создание сплавов, содержащих интерметаллидные фазы. Примером являются суперсплавы на основе смеси γ' - и γ -фаз, в которых γ -фаза представляет собой неупорядоченный ГЦК-твердый раствор на основе, в частности, никеля и алюминия, а γ' -фаза (в нашем случае фаза Ni_3Al) – упорядоченную фазу со сверхструктурой $L1_2$ [1]. 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, Re [1, 2]. Легирование позволяет значительно повысить рабочую температуру суперсплавов и сопротивление ползучести.

Жаропрочные сплавы на основе никеля, как правило, обладают сложным химическим составом. Большое внимание уделяется сплавам на основе Ni-Al, легированным различными элементами, в частности, Re и Ru [2]. Установлено, что сплавы с различным содержанием Re и Ru являются

* Работа выполнена при поддержке государственного задания на проведение научных исследований по проекту № 3.8320.2017/БЧ

многофазными [1]. Число различных фаз зависит от концентрации рения и рутения. Оно, как правило, возрастает с ростом концентрации этих элементов.

Целью настоящей работы является исследование влияния высокотемпературного отжига на структурно-фазовое состояние жаропрочного сплава на основе Ni-Al.

Материал и методы исследования. Исследуемый сплав содержит такие элементы, как: Al, Co, а также Mo, Cr, W, Ta (их суммарное процентное содержание в сплаве около 7 ат. %), Re, Ru (~ 4 ат. %). Основу сплава составлял Ni. Сплав исследовался после отжига при 1000°C продолжительностью: 1) 118 часов; 2) 372 часа. Исследуемый сплав обладал монокристаллической структурой (ориентация [001]). Основными методами исследования являлись: просвечивающая дифракционная электронная микроскопия на тонких фольгах и рентгеноструктурный анализ.

Результаты и их обсуждение. Основными фазами, образующими сплав, являются две фазы: γ и γ' . Присутствующие в сплаве элементы неоднородно распределены между γ - и γ' -фазами: Ni – примерно одинаково; Co – в 2 раза больше в γ -фазе, чем в фазе γ' ; большая часть Cr и Mo сосредоточена также в γ -фазе. Этой фазе отдает преимущество в распределении и W. Наконец, Re и Ru практически полностью находится в γ -фазе. Такие элементы, как Al и Ta, напротив, сосредоточены в γ' -фазе. В ее упорядоченной структуре они занимают вершины куба, а Ni и Co – преимущественно в центре граней.

В состоянии после отжига при температуре 1000°C, 118 часов присутствуют практически только эти две фазы в соотношении γ' / γ , как 3 / 1 (см. рис.1). На рис.1а представлены электронно-микроскопические изображения γ' - и γ - фаз, наблюдаемые в сплаве. Четко прослеживается, что γ' -фаза представлена в сплаве достаточно правильными квазикубоидами. Иногда они вытянуты вдоль одного направления и имеют форму параллелепипедов. Небольшая часть Re находится в виде мелких частиц фазы $Al_6(Re,Ru)$ на дислокациях (рис.1б).

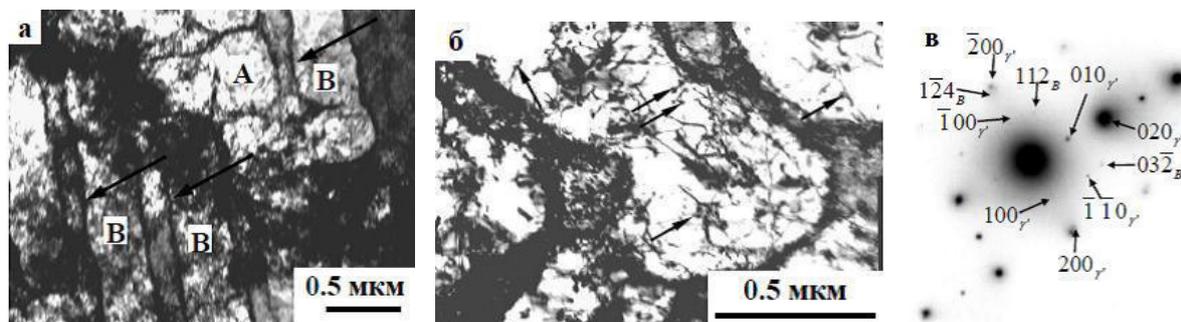


Рис.1. Тонкая структура сплава после отжига 1000°C, 118 часов. На (а) черными стрелками отмечены прослойки γ -фазы, «А» и «В» - квазикубоиды и квазипараллелепипеды γ' -фазы, соответственно.

Стрелками на (б) отмечены частицы $Al_6(Re,Ru)$ на дислокациях в γ' -фазе, на (в) – рефлексы, принадлежащие γ' -фазе, отмечены индексом « γ' », фазе $Al_6(Re,Ru)$ – индексом «В»

После более длительного высокотемпературного отжига (372 часа) в небольшом количестве появляются новые вторичные фазы, такие как σ -фаза и δ -фаза, фаза Лавеса (см. табл.1).

В ходе более продолжительного отжига происходит многофакторное изменение структуры материала. Возникающие в ходе отжига структуры разделяются на 4 типа.

Во-первых, это квазикубоиды (рис.1), во-вторых, полосовые анизотропные структуры (рис.2а), в-третьих, анизотропные структуры полосового типа с выделением σ -фазы (рис.2б) и, в-четвертых, бесструктурные участки с крупными двухфазными областями (рис.2в).

Таблица 1

Объемная доля фаз после различных термических обработок

Режим термообработки	Основные фазы (± 0.01)		Вторичные фазы (± 0.0005)			
	γ'	γ	Al ₆ Re	σ	δ	фаза Лавеса
отжиг 1000 ⁰ C, 118 ч.	0.72	0.25	0.03	нет	нет	нет
отжиг 1000 ⁰ C, 372 ч.	0.823	0.16	нет	0.008	0.008	0.001

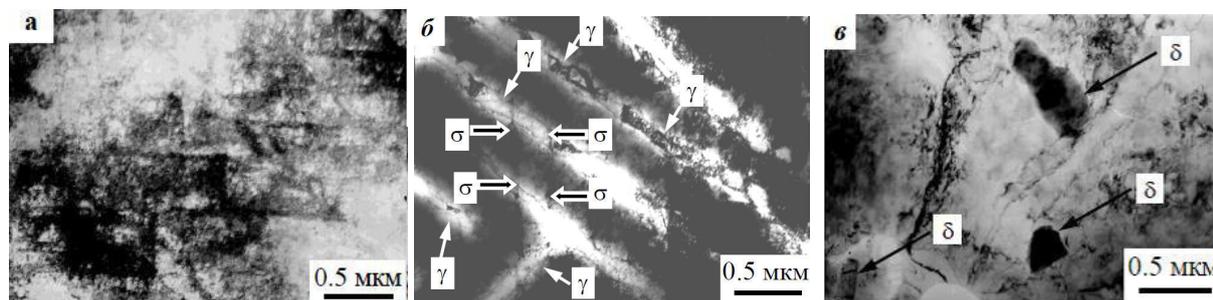


Рис.2. Электронно-микроскопическое изображение структуры сплава после отжига 1000⁰C, 372 часа: а – полосовая анизотропная структура; б – анизотропная структура с выделением σ -фазы (обозначена черно-белыми стрелками), белыми стрелками отмечена γ -фаза; в – бесструктурные участки γ -фазы с крупными частицами δ -фазы, внутри которых находятся выделения фазы Лавеса

Таким образом, установлено, что при отжиге происходит процесс разрушения кубоидной структуры материала. Этот процесс протекает в несколько стадий. Сначала округляются квазикубоиды γ' -фазы и размываются границы γ / γ' . Затем квазикубоиды превращаются в параллелепипеды. Степень дальнего порядка в γ' -фазе уменьшается, и в заключении остается лишь неупорядоченная γ -фаза. Так же проходит процесс фазовой перекристаллизации с образованием и выделением новых фаз. Это следующие фазы: δ -фаза (Al₃Ta₃Ru), фаза Лавеса (Ta₃Ni₂Cr₂Co) и σ -фаза (Ni,Co,Al,Re)_x(Cr,Mo,Ta,W)_y. Именно образование этих фаз забирает из γ' -фазы необходимые элементы для создания дальнего порядка. Этот процесс обусловлен высокой скалярной плотностью дислокаций, полями внутренних напряжений, фазовой перекристаллизацией, но особенно, и прежде всего, формированием σ -фазы. Этот последний процесс фазовой перекристаллизации наиболее существенным образом меняет свойства материала и влияет на его работоспособность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов Э.В., Смирнов А.Н., Никоненко Е.Л., Попова Н.А., Конева Н.А. Морфология фаз и фазовые превращения при термической обработке суперсплавов на основе Ni-Al-Cr и Ni-Al-Co. Масштабные и концентрационные эффекты. – М.: Инновационное машиностроение, 2016. – 175 с.
2. Nikonenko E.L., Popova N. A., Dement T. V, Koneva N. A. Structure and phase composition of Ni–Al–Cr alloy alloyed by rhenium and lanthanum // Russian Physics Journal. – 2017. - V. 60. - No. 2. – P. 231-235.