

ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ

УДК 669.1'26'24:539.25

ВЛИЯНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВ НА СТРУКТУРУ И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА INCONEL 718

© 2015 г. А. Н. Черепанов*, В. Е. Овчаренко**,***

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1

**Национальный исследовательский Томский политехнический университете,
634050 Томск, просп. Академический, д. 2/1

***Институт физики прочности материалов СО РАН, 634021 Томск, пл. Ленина, д. 30
e-mail: ancher@itam.nsc.ru; ove45@mai.ru

Поступила в редакцию 19.03.2015 г.;
в окончательном варианте – 21.04.2015 г.

Представлены результаты экспериментального исследования влияния порошковых наномодификаторов из тугоплавких соединений на прочностные свойства, макро- и микроструктуру жаропрочного сплава Inconel 718. Показано, что введение в расплав порошковых модификаторов приводит к уменьшению среднего размера зерна в сплаве в 1.5–2 раза. Длительная прочность на разрыв сплава при 650°C повышается 1.5–2 раза, число циклов до разрушения при 482°C увеличивается более чем в 3 раза. Указанное влияние наночастиц на зеренную структуру и прочностные свойства сплава обусловлено увеличением числа образующихся центров кристаллизации и формированием скоплений наночастиц тугоплавких соединений на границах и стыках образовавшейся зеренной структуры, препятствующих развитию процессов рекристаллизации сплава.

Ключевые слова: жаропрочный сплав, нанопорошки, интерметаллиды, наномодифицирование, структура, прочностные свойства.

DOI: 10.7868/S0015323015100046

ВВЕДЕНИЕ

Высоколегированный железо-хромоникелевый сплав Inconel 718, благодаря высоким значениям коррозионной стойкости и жаропрочности, широко используется для изготовления теплонагруженных деталей газотурбинных авиационных двигателей, энергосиловых установок, изделий космической техники. Однако высокое содержание легирующих элементов обуславливает повышенную крупность зеренной структуры сплава, что снижает уровень его эксплуатационных свойств. Повышение дисперсности структуры существенно повышает пределы текучести и прочности никелевых сплавов, при этом увеличивается срок службы в условиях циклических нагрузок [1–5].

Одним из эффективных методов повышения дисперсности структуры металлических сплавов является применение модифицирующих добавок к сплавам в виде наноразмерных частиц тугоплавких химических соединений [6–9]. Эти частицы могут не иметь ориентационного и размерного соответствия с кристаллической структурой сплава, но обладают способностью к адсорбции и удержанию на своей поверхности металлических пленок,

изоморфных с кристаллической структурой сплава. При взаимодействии с металлическим расплавом на поверхности наночастиц образуются устойчивые химические соединения, предохраняющие наночастицы от растворения в расплаве и препятствующие их коагуляции, обеспечивая при этом смачиваемость их поверхности расплавом. В процессе охлаждения и кристаллизации металлического расплава указанные частицы проявляют себя в качестве центров кристаллизации, формирующих зеренную структуру сплава. При достаточно большом количестве наночастиц тугоплавких химических соединений в расплаве образуется повышенное количество центров кристаллизации, соответственно увеличивается количество и уменьшается размер зерен в затвердевшем сплаве.

Основным недостатком метода диспергирования зеренной структуры сплавов введением в расплав наноразмерных частиц тугоплавких соединений является их растворимость в расплаве. Сказанное особенно актуально в случае никелевых сплавов, расплавы которых отличаются высокой химической активностью по отношению к

Таблица 1. Химический состав сплава Inconel 718

Элемент	C	Nb	Ti	Co	Mo	Al	Cr	Ni	Si	Mn	Fe
Мас. %	0.08	4.95	0.95	1.00	3.07	0.55	19.5	53.00	0.35	0.35	Остальное

большинству известных химических соединений. Высокая растворимость частиц химических соединений в никелевых расплавах в значительной мере ограничивает выбор перспективных в качестве модификаторов тугоплавких соединений. Но с другой стороны, высокая растворимость предопределяет более высокую смачиваемость расплавом поверхности модифицирующих частиц и соответственно их более высокую эффективность как центров кристаллизации расплава. Указанное противоречие может быть минимизировано применением композиционных порошковых частиц, армированных наноразмерными частицами тугоплавких химических соединений, например, на основе интерметаллического соединения NiAl. Покрываются из NiAl замедляют процессы растворения наночастиц в никелевом расплаве, повышая вероятность образования центров кристаллизации в процессе охлаждения расплава.

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния наноразмерных частиц тугоплавких химических соединений в составе порошковых композиций на основе интерметаллида NiAl на структурно-фазовое состояние и прочностные свойства жаропрочного сплава Inconel 718.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Химический состав сплава Inconel 718 приведен в табл. 1. В качестве наноразмерных порошковых модификаторов были использованы наночастицы нитрида титана TiN и карбонитрида титана TiC_{0.5}N_{0.5} (рис. 1).

Композиционные компакты на основе NiAl были получены методом высокотемпературного синтеза интерметаллида под давлением в порошковых смесях никеля с алюминием стехио-

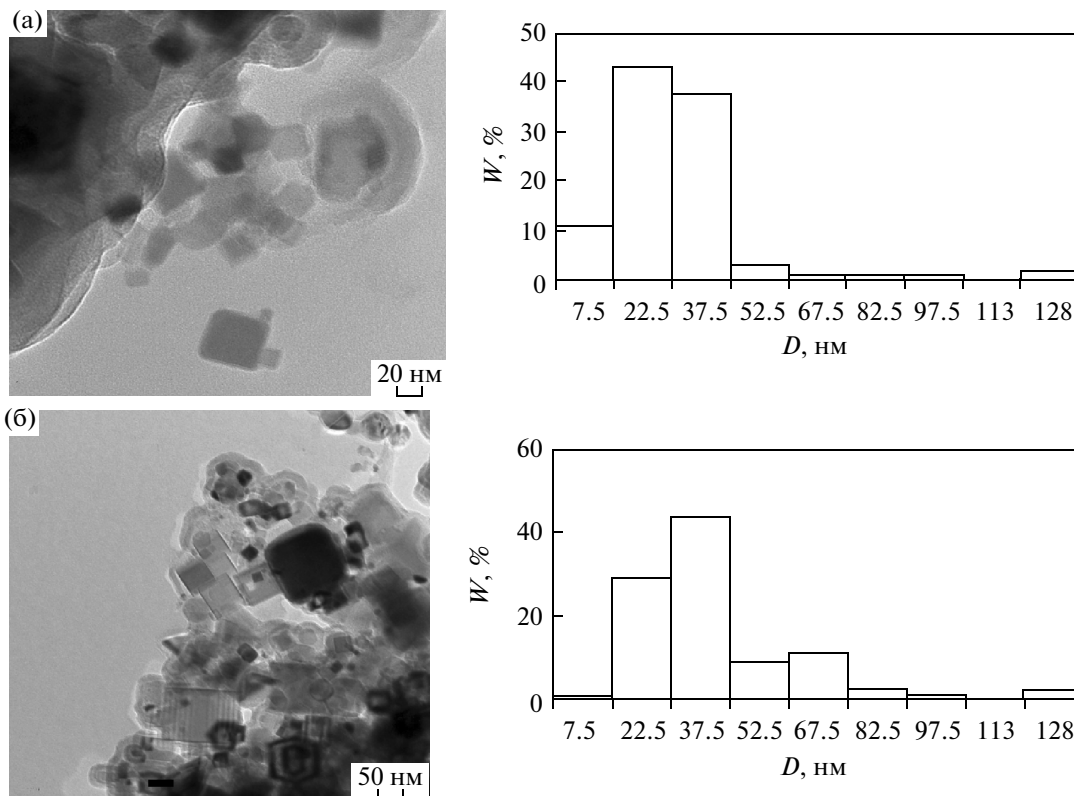


Рис. 1. Общий вид наночастиц нитрида титана TiN (а) и карбонитрида титана TiC_{0.5}N_{0.5} (б) и их распределение по размерам.

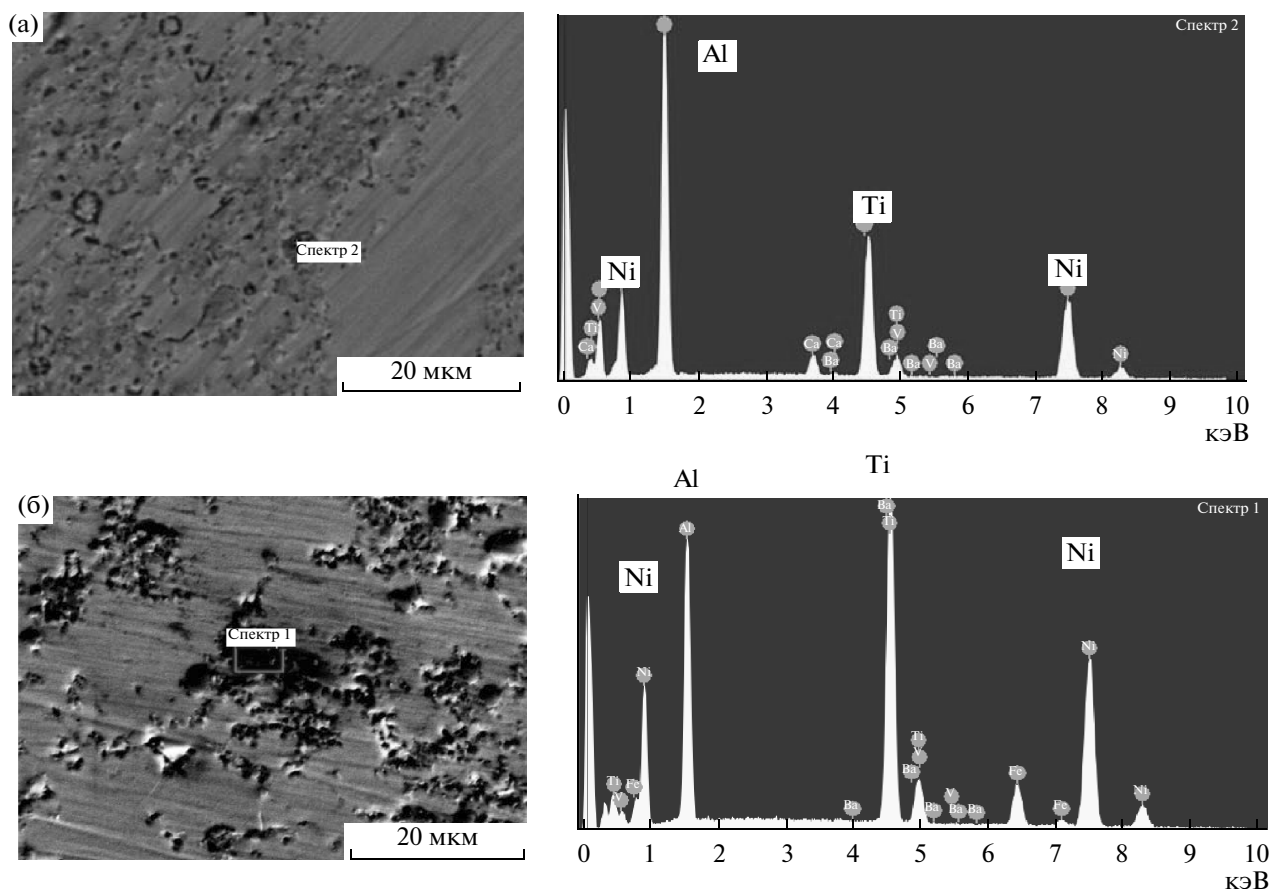


Рис. 2. Микроструктуры композиционных частиц (NiAl + 0.04% TiN) (а) и (NiAl + 0.06% TiC_{0,5}N_{0,5}) (б) и данные локального рентгеноспектрального анализа элементного состава частицы нитрида титана и карбонитрида титана в NiAl-матрице.

метрического состава, содержащих заданное количество наноразмерных порошков тугоплавких соединений. Синтезированные композиционные компакты подвергали механическому измельчению до состояния композиционных порошковых частиц заданного размера. В качестве модифицирующих композиционных порошков были исследованы композиции NiAl + 0.04% TiN и NiAl + 0.06% (TiN + TiC_{0,5}N_{0,5}), % по массе.

На рис. 2 представлены микроструктуры композиционных порошков, содержащих наночастицы нитрида титана TiN (рис. 3) и карбонитрида титана TiC_{0,5}N_{0,5}, и данные локального рентгеноспектрального анализа их химического состава.

Модификацию структурно-фазового состояния сплава осуществляли путем введения композиционных порошков в расплав при температуре 1480–1500°C и разливкой расплава после 1.5–2 мин выдержки в нагретые до температуры 900°C керамические формы непосредственно в вакуумной камере индукционной печи.

Анализ зеренной структуры образцов сплава проводили после химического травления, структуру

исследовали методами металлографии (оптический микроскоп Neofot-32), сканирующей электронной микроскопии (Quanta 200 3D) и просвечивающей электронной микроскопии (Philips CM 30). Тонкие фольги для просвечивающей электронной микроскопии были получены методом электролитической полировки тонких (0.1 мм) срезов с образцов модифицированного сплава. Прочностные свойства сплава исследовали методами испытаний на растяжение, на длительную прочность и циклическую усталость.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Прочностные свойства и зеренная структура сплава Inconel 718

В табл. 2 и 3 представлены данные о прочностных свойствах сплава при его растяжении при комнатной температуре. Эти данные позволяют констатировать, что введение в расплав жаропрочного сплава Inconel 718 композиционных порошков, содержащих нанодисперсные частицы тугоплавких соединений, приводит к увеличению на

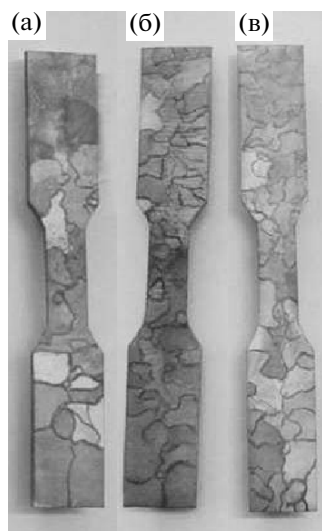


Рис. 3. Зеренная структура сплава Inconel 718 в исходном состоянии (а) и после модифицирования композиционными порошками (NiAl + 0.04% TiN) (б) и (NiAl + 0.06% TiC_{0,5}N_{0,5}) (в).

12–20% временного сопротивления к разрушению, на 26–58% относительного удлинения при комнатной температуре, повышению длительной прочности при 650°C под нагрузкой 195 МПа в 1.5–2 раза и увеличению числа циклов более чем в 3 раза при 482°C.

Исследование зеренной структуры сплава Inconel 718 после термообработки показало, что указанное повышение прочностных свойств сплава при его модификации композиционными порош-

ками NiAl + 0.04% TiN и NiAl + 0.06% (TiN + TiC_{0,5}N_{0,5}) обусловлено уменьшением среднего размера зерна в сплаве в 1.5–2 раза (рис. 3). Средний размер зерен в образцах сплава был определен методом случайных секущих как средняя величина из 100 измерений.

3.2. Влияние наночастиц тугоплавких соединений на тонкую структуру сплава Inconel 718

В исходном состоянии дислокационная субструктура никелевого сплава характеризуется скоплениями хаотически распределенных дислокаций (рис. 4а). Скалярная плотность дислокаций $\rho = 2.5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Размер зерен очень большой (миллиметры), т.к. на фольге не наблюдаются границы зерен. В отдельных случаях в объеме зерен выявляются включения второй фазы размером ~50 нм, располагающиеся в виде строчек (рис. 4б). Индексирование микроэлектроннограммы (рис. 4в) показывает, что данные частицы имеют состав FeNi и образовались в результате дендритной ликвации железа.

Модифицированный добавками композиционного порошка NiAl + 0.04% TiN сплав имеет, как и в случае сплава в исходном состоянии, хаотическую дислокационную структуру при скалярной плотности дислокаций $\rho = 3.0 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$. В объеме зерен выявляются включения нитрида титана TiN размером 50–150 нм, которые распределены преимущественно по границам зерен (рис. 5). В случае модификации структуры сплава Inconel 718 композиционным порошком NiAl + 0.06% (TiN +

Таблица 2. Прочностные характеристики сплава Inconel 718 при $T = 25^\circ\text{C}$

Структурно-фазовое состояние сплава	σ_b , МПа	σ_{02} , МПа	δ_S , %	ψ , %
Исходное состояние	910	841	7.2	8.2
Модифицированное композиционным порошком NiAl + 0.04% TiN	1100	960	9.1	28.6
Модифицированное композиционным порошком NiAl + 0.06% (TiN + TiC _{0,5} N _{0,5})	1087	958	15.7	23.1

Таблица 3. Жаропрочностные характеристики сплава Inconel 718

Структурно-фазовое состояние сплава	Длительная прочность при температуре 650°C под нагрузкой 195 МПа			Циклическая усталость при температуре 482°C
	τ , ч	δ_S , %	ψ , %	количество циклов
Исходное состояние	69.00	6.28	3.17	3360
Модифицированное композиционным порошком (NiAl + 0.04% TiN)	107.50	6.76	3.57	11 531
Модифицированное композиционным порошком (NiAl + 0.06% TiC _{0,5} N _{0,5})	144.40	4.84	2.20	11 239

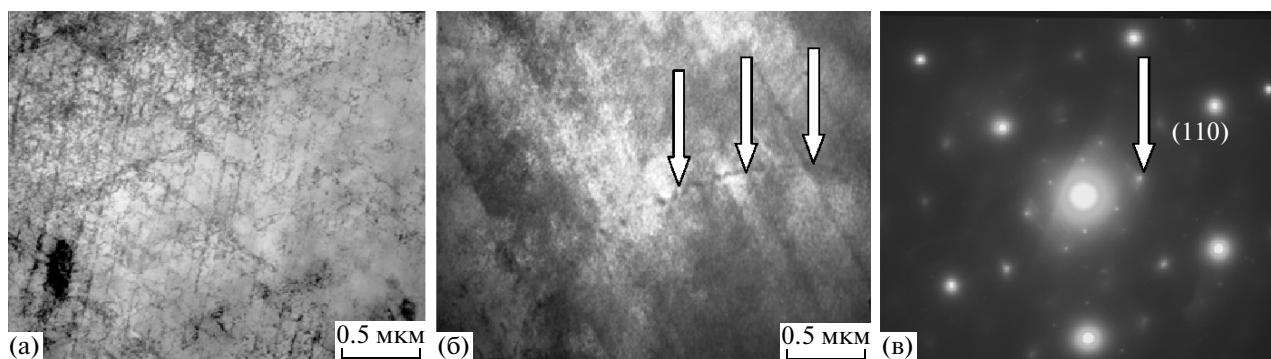


Рис. 4. Дислокационная субструктура (а) и включения второй фазы FeNi (б) (указаны стрелками) в исходном состоянии сплава Inconel 718. На микроэлектроннограмме (в) стрелкой указан рефлекс фазы FeNi.

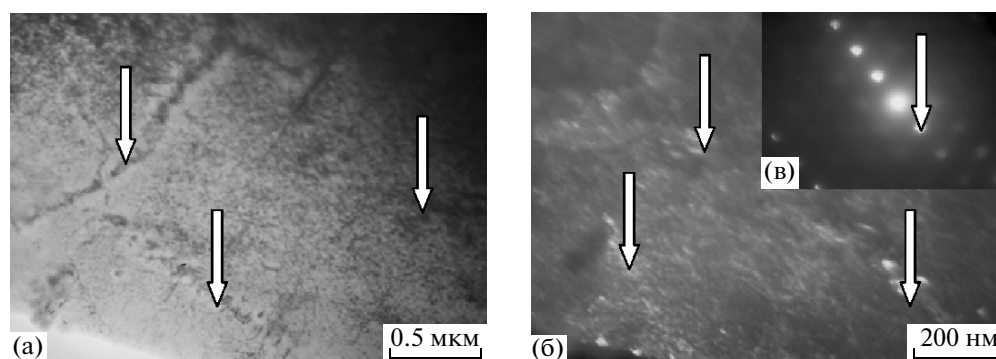


Рис. 5. Распределение наночастиц TiN в зеренной структуре сплава Inconel 718 (указаны стрелками); а – светлое поле, б – темное поле, полученное в рефлексах (111) сплава Inconel 718, в – микроэлектроннограмма, стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле.

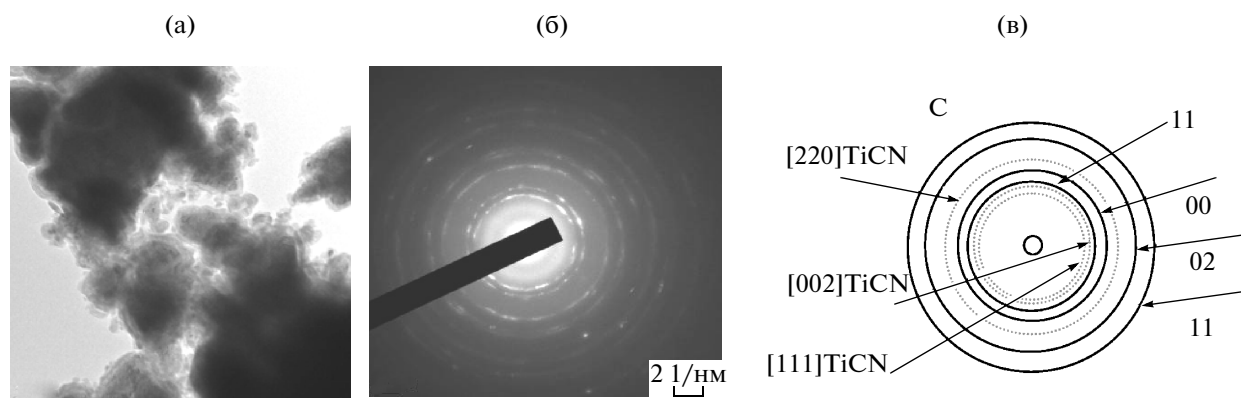


Рис. 6. Субмикроструктурные прослойки по границам зерен модифицированного композиционным порошком ($\text{NiAl} + 0.06\% \text{TiC}_{0.5}\text{N}_{0.5}$) сплава Inconel 718 (на (а) указаны стрелками), состоящие из наночастиц карбонитрида титана; а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма; в – схема расшифровки микроэлектроннограммы (сплошными кольцами указаны рефлексы сплава Inconel 718, пунктирными кольцами – $\text{TiC}_{0.5}\text{N}_{0.5}$).

+ $\text{TiC}_{0.5}\text{N}_{0.5}$) на границах зерен сплава формируются субмикроструктурные прослойки из частиц $\text{TiC}_{0.5}\text{N}_{0.5}$ (рис. 6). Размеры частиц в прослойках составляют 10–20 нм, размеры скопленных частиц в прослойках достигают 50 нм.

Представленные результаты исследования тонкой структуры модифицированного композици-

онными порошками на основе интерметаллида NiAl, армированных наночастицами нитрида титана TiN и карбонитрида титана $\text{TiC}_{0.5}\text{N}_{0.5}$, показали следующее. Модифицирующее влияние нанопорошков тугоплавких соединений на размер зеренной структуры сплава Inconel 718 выражается в образовании в сплаве микрообъемов с субмикроструктурной структурой и субмикрострук-

лических прослоек на стыках и границах зерен, содержащих наночастицы нитрида и карбонитрида титана. В первом случае проявляется нуклирующее влияние наночастиц тугоплавких соединений на процессы зарождения зеренной структуры сплава (увеличение количества зародышей кристаллизации расплава). Во втором случае наночастицы тугоплавких соединений являются стопорами для движения границ зерен в процессе формирования зеренной структуры сплава. Конечным результатом модифицирующего влияния наночастиц тугоплавких соединений является уменьшение среднего размера зерна и повышение прочностных свойств сплава.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Применение нанопорошковых модификаторов оказывает существенное влияние на структуру и прочностные свойства сплава Inconel 718: в 1.5–2 раза уменьшается средний размер зерен, в 1.5–2 раза увеличивается прочность на разрыв при 650°C, число циклов до разрушения при 482°C возрастает более чем в 3 раза.

2. Введение в металлический расплав композиционных порошков с заданным содержанием наночастиц нитрида или карбонитрида титана инициирует несколько независимых процессов. Основными из которых являются увеличение количества образующихся центров кристаллизации (зародышей зеренной структуры) и формирование скоплений частиц тугоплавких соединений на границах и стыках образовавшейся зеренной структуры. Увеличение количества зародышей является необходимым условием уменьшения среднего размера зерен, а осаждение частиц тугоплавких соединений на границах образовавшихся зерен

замедляет процессы рекристаллизации (предотвращает увеличение размера контактирующих зерен путем их объединения).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Denzine A.F., Kolakowski T.A., Wallace J.F.* Superalloy-High Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power. John Wiley & Sons, 1984. 385 с.
2. *Singer R.F.* New Materials for Industrial Gas Turbines // *Mat. Sci. Techn.* 1987. V. 3. P. 726–732.
3. *Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р.* Жаропрочность никелевых сплавов. М.: Машиностроение, 1998. 463 с.
4. *Mulyukov R.R., Nazarov A.A., Imaev R.M.* Deformational Methods of Materials nanostructuring: premises, history, state of the art, and prospects // *Russian Physics Journal.* 2008. V. 51. № 5. P. 492–504.
5. *Cao Lamei, Cherepanov A.N., Tang Xin, Gu Haipeng, Li Ailan, Zhang Yong.* Effect of nanopowdered refractory compound on the refinement of solidifying structure and properties of K403 superalloy // *Rare Metals.* V. 28. Spec. Issue. Oct. 2009. P. 1–4.
6. *Сабуров В.П., Черепанов А.Н., Жуков М.Ф. и др.* Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модифицирования металлов и сплавов. Новосибирск: Наука, 1996. 312 с.
7. *Сабуров В.П., Еремин Е.Н., Черепанов А.Н. и др.* Модифицирование сталей и сплавов дисперсными инокуляторами. Омск: изд-во ОмГТУ, 2002.
8. *Манолов В., Черепанов А., Лазарова Р., Константинова С.* Влияние нанопорошковых инокуляторов на структуру и свойства алюминиевого сплава AlSi₇Mg // *Литейное производство.* 2011. № 11. С. 11–14.
9. *Cherepanov A., Manolov V., Poluboyarov V.* Modification of grey cast iron properties with nanopowders of refractory compounds // *J. Mater. Sci. and Techn.* V. 20. 2013. № 2. P. 101–107.

Сдано в набор 17.07.2015 г.	Подписано к печати 28.09.2015 г.	Дата выхода в свет 23.12.2015	Формат 60 × 88 ¹ / ₈
Цифровая печать	Усл. печ. л. 14.0	Усл. кр.-отг. 1.3 тыс.	Уч.-изд. л. 14.0
	Тираж 89 экз.	Зак. 798	Цена свободная

Учредители: Российская академия наук, Уральское отделение РАН, ФГБУН Институт физики металлов

Издатель: Российская академия наук. Издательство “Наука”, 117997 Москва, Профсоюзная ул., 90

Оригинал-макет подготовлен МАИК “Наука/Интерпериодика”

Отпечатано в ППП «Типография “Наука”», 121099 Москва, Шубинский пер., 6