

УДК 536.421.5;536.46

МАСШТАБНЫЕ ЭФФЕКТЫ В СТРУКТУРЕ СОВРЕМЕННЫХ СУПЕРСПЛАВОВ. РОЛЬ НАНОЧАСТИЦ

© 2008 г. Н. А. Конева¹, Е. Л. Никоненко¹, Н. А. Попова¹, М. В. Федорищева²,
Ю. Р. Колобов³, Э. В. Козлов¹

E-mail: Koneva@tsuab.ru

В работе подробно рассмотрено структурное состояние γ' - и γ -фаз современных суперсплавов. Предложена классификация масштабных эффектов в морфологии γ' -фазы.

ВВЕДЕНИЕ

Современные суперсплавы представляют собой двухфазную смесь γ' и γ . Размерным эффектам в структуре современных суперсплавов уделяют мало внимания. Между тем проблема упрочнения суперсплавов при различных температурах тесно связана с размерными эффектами. Настоящая работа детализирует некоторые варианты структуры современных суперсплавов с точки зрения размерного эффекта γ' - и γ -фаз. Проанализированы размеры частиц γ' -фазы в виде как квазикубоидов, так и другой формы. Одновременно рассмотрены размеры прослоек γ -фазы.

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ СОВРЕМЕННЫХ СУПЕРСПЛАВОВ

Основные фазы. 1) γ' -фаза – это ГЦК упорядоченный твердый раствор на основе Ni со сверхструктурой $L1_2$ (тип Cu_3Au) [1]. Количество ее колеблется в разных состояниях от 0.7 до 0.85 от общего объема материала. Морфологически основная доля γ' -фазы представляют собой квазикубоиды с довольно четкой огранкой, окруженные прослойками γ -фазы (рис. 1).

Современные суперсплавы отличает большая объемная доля γ' -фазы в виде кубоидов. Обобщающая схема сложной иерархической структуры суперсплава приведена на рис. 2. В общем случае в составе сплава могут присутствовать четыре структурных уровня γ' -фазы. Они отличаются размерами и обозначены по мере уменьшения их как γ'_I , γ'_{II} , γ'_{III} и γ'_{IV} . Кубоиды γ'_{II} обычно имеют размеры “мезоуровня”. Двухфазная смесь ($\gamma + \gamma'_{II}$), содержащая высокую плотность кубоидов, явля-

ется основной фазово-морфологической составляющей суперсплава. Она стабильна под действием температуры и напряжений.

МАСШТАБНЫЕ ЭФФЕКТЫ В МОРФОЛОГИИ γ' -ФАЗЫ

На рис. 2 представлена схематическая картина структуры суперсплава, построенная на основе обобщения ряда исследований. Классификация частиц γ' -фазы и двухфазных смесей $\gamma' + \gamma$ по размерам дана в таблице. Структурная смесь $\gamma'_{II} + \gamma$ занимает основной объем суперсплава и образует большие протяженные области размером вплоть до 500 мкм. В реальных суперсплавах встречаются и другие масштабные образования γ' -фазы и смеси ($\gamma' + \gamma$)-фаз. Прежде всего могут присутствовать крупные частицы γ'_{I} -фазы дендритного происхождения. Это от-

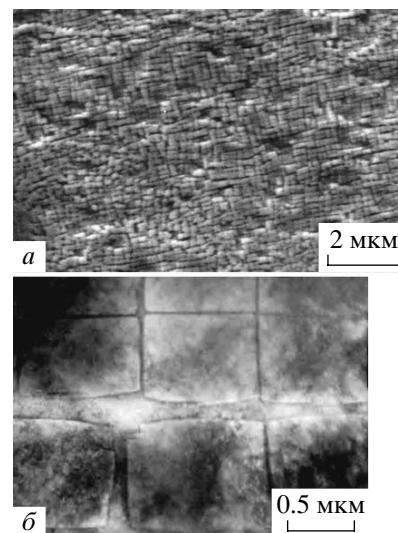


Рис. 1. Типичный пример двухфазной структуры ($\gamma' + \gamma$) суперсплава: *a* – изображение, полученное в растровом электронном микроскопе; *b* – в просвечивающем.

¹ Томский государственный архитектурно-строительный университет.10

² Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск.

³ Белгородский государственный университет, Центр наноструктурных материалов.

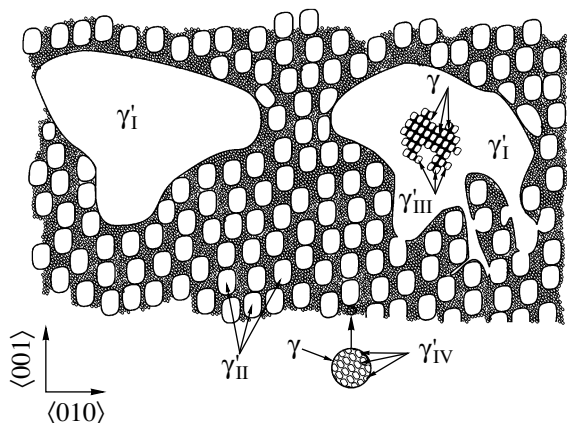


Рис. 2. Схематическое изображение морфологии γ - и γ' -фаз на разных масштабных уровнях в суперсплаве.

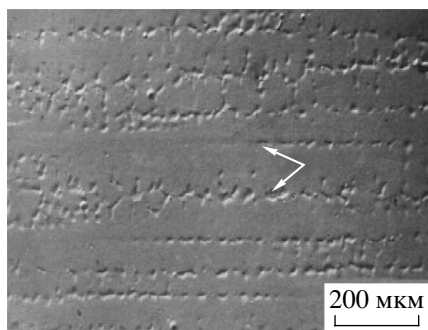


Рис. 3. Изображение структуры суперсплава, полученное методом растровой электронной микроскопии (стрелками отмечены частицы γ' -фазы первого уровня).

дельно отстоящие друг от друга частицы неправильной формы, вытянутые вдоль направления $\langle 001 \rangle$ таким образом, что при относительно небольших увеличениях имеют вид дендритной структуры (рис. 2–4). Прослойки между этими частицами заполнены смесью ($\gamma'_{II} + \gamma$)-фаз. В свою очередь пространство между кубоидами γ'_{II} -фазы второго уровня заполнено прослойками мелкодисперсной смеси ($\gamma'_{IV} + \gamma$)-фаз.

Основная морфологическая составляющая – это смесь двух фаз: γ и γ'_{II} , что особенно четко видно при больших увеличениях (рис. 4б–г). В этой смеси присутствуют частицы γ' -фазы квазикубоидной формы. Частицы γ'_{II} выстроены достаточно четко в двух направлениях типа $\langle 001 \rangle$.

Растровая электронная микроскопия достаточно убедительно выявляет в структуре сплава существование областей γ' -фазы двух масштабных уровней. Первый уровень – крупные частицы (25–90 мкм) γ'_I -фазы и второй уровень – более

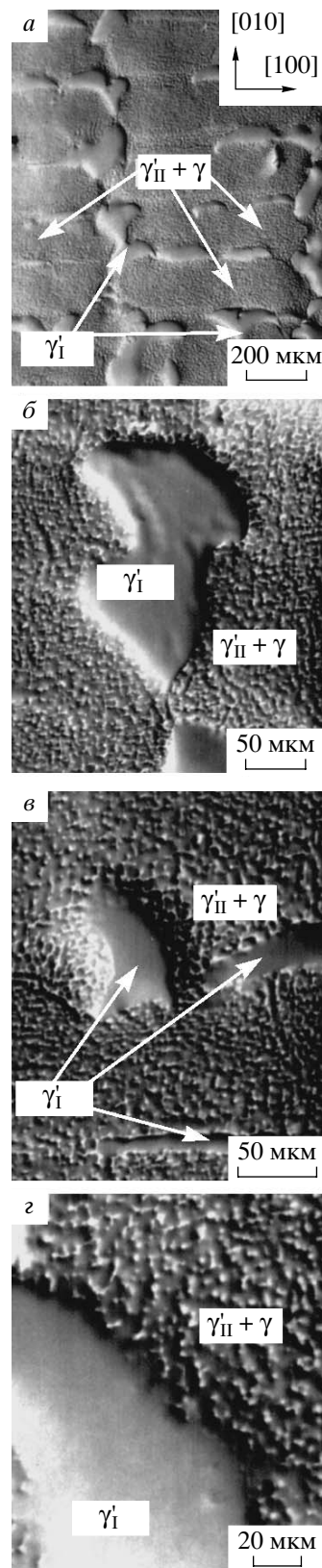


Рис. 4. РЭМ-изображение структуры суперсплава. Стрелками обозначены присутствующие фазы.

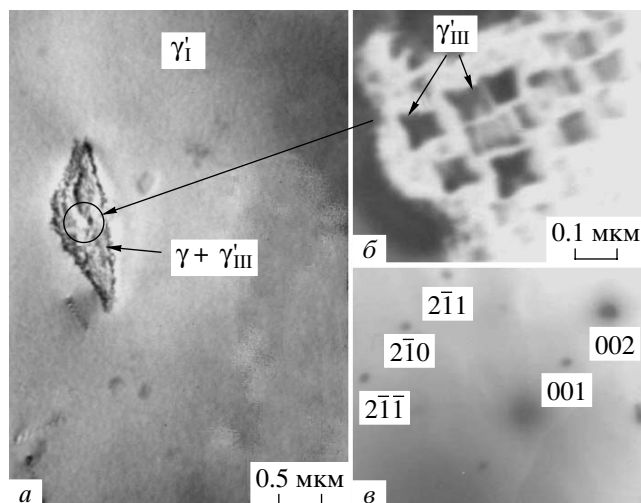


Рис. 5. Сложная структура частиц γ'_I -фазы первого уровня в суперсплаве: *a* – светлопольное изображение, внутри частицы γ'_I находится двухфазная смесь $\gamma'_{III} + \gamma$; *b* – темнопольное изображение в сверхструктурном рефлексе [001], стрелками указаны частицы γ'_{III} , между которыми находятся прослойки γ -фазы; *в* – микродифракционная картина, содержащая сверхструктурные рефлексы 001, $2\bar{1}\bar{1}$, $2\bar{1}0$, $2\bar{1}1$.

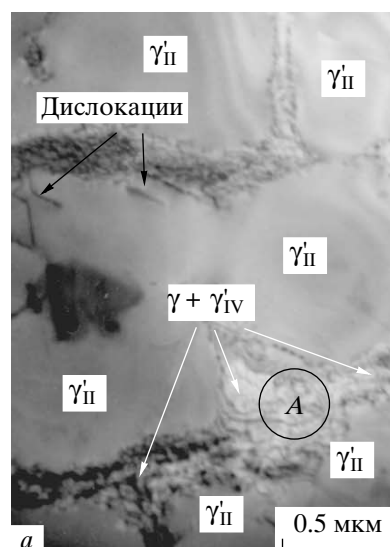
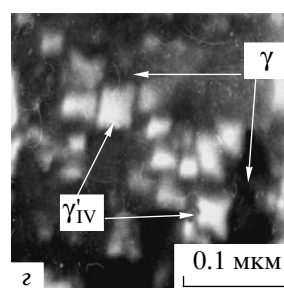
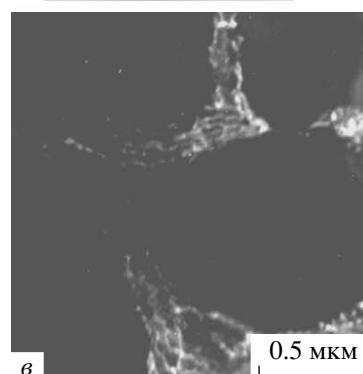
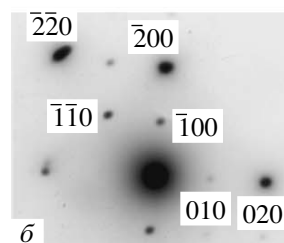


Рис. 6. Изображение структуры суперсплава, полученное методом ПЭМ: *a* – светлопольное изображение частиц γ'_{II} , белыми стрелками показаны участки двухфазной смеси $\gamma + \gamma'_{IV}$, черными стрелками – дислокации; *b* – микродифракционная картина, соответствующая данному участку фольги и содержащая сверхструктурные рефлексы $\bar{1}\bar{1}0$, $\bar{1}00$, 010; *в* – темнопольное изображение в основном рефлексе 020; *г* – темнопольное изображение участка *A* в сверхструктурном рефлексе 010, белыми стрелками указаны фазы, находящиеся в двухфазной смеси $\gamma + \gamma'_{IV}$.

мелкие частицы (2.5–10 мкм) γ'_{II} -фазы, находящиеся в смеси $\gamma'_{II} + \gamma$. Частицы фазы γ'_{II} второго уровня обнаруживают коагуляцию вдоль некоторых направлений (рис. 4з), т.е. наблюдается так называемая “рафт”-структура [2].

Изучение частиц γ'_I -фазы первого уровня, которые выглядели на РЭМ-изображениях как однофазные, показало сложное строение этих областей. Среди участков γ'_I -фазы встречаются как однородные частицы, так и неоднородные (рис. 5).



При большом увеличении видно, что наблюдаются частицы γ'_I -фазы двух типов: одни – однофазные (γ'_I), другие содержат в себе как включения двухфазные области $\gamma'_{III} + \gamma$ (рис. 5). Двухфазные области могут возникнуть в результате распада γ'_I по реакции $\gamma'_I \rightarrow \gamma'_{III} + \gamma$ при отжиге суперспла-

Параметры морфологической структуры γ' - и γ -фаз

Номер структурного уровня	Структурный уровень	Элементы структуры	Масштаб размеров частиц γ' -фазы
I	Основная структура суперсплава	Области $\gamma'_{II} + \gamma$	150–500 мкм
II	Остатки дендритных образований	Частицы γ'_I	25–90 мкм
III	Мезоуровень	Частицы γ'_{II}	2.5–10 мкм
		Области $\gamma'_{III} + \gamma$	0.45–1.0 мкм
IV	Микроуровень	Прослойки $\gamma'_{IV} + \gamma$	250–700 нм
V	Наноуровень	Частицы γ'_{III}	90–130 нм
		Частицы γ'_{IV}	30–80 нм
		Прослойки γ -фазы в смеси фаз $\gamma'_{III} + \gamma$	10 нм
		Прослойки γ -фазы в смеси фаз $\gamma'_{IV} + \gamma$	2–5 нм

ва. Объемная доля этих областей сравнительно невелика, их примеры представлены на рис. 5. Эти области состоят из квазикубических частиц γ'_{III} -фазы размером 90–130 нм и прослоек γ -фазы шириной ~10 нм. На светлопольных изображениях рис. 5 видны частицы γ'_{III} , разделенные прослойками γ -фазы. Тонкая структура квазикубоидных частиц γ'_{II} -фазы второго уровня и прослоек γ -фазы между ними в смеси $\gamma'_{II} + \gamma$ хорошо видна также на электронно-микроскопических снимках рис. 6. На дифракционных картинах, соответствующих смеси $\gamma'_{II} + \gamma$, наблюдаются сверхструктурные рефлексы γ' -фазы. На границах γ' - и γ -фаз имеются дислокации. Детальное изучение двухфазной смеси $\gamma'_{II} + \gamma$ методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) показало, что прослойки γ -фазы в этой смеси также имеют сложное строение (рис. 6). Они содержат мелкие квазикубические частицы γ'_{IV} -фазы, которые на РЭМ-изображениях не обнаруживаются. Их идентификация с использованием светлопольного и темнопольного (в сверхструктурном рефлексе [010]) изображений представлена на рис. 6 б, г. Мелкие частицы γ' -фазы, размер которых составляет 30–80 нм, классифицированы здесь как γ'_{IV} -частицы γ' -фазы четвертого уровня. Прослойки γ -фазы между частицами γ'_{IV} имеют толщи-

ну 2–5 нм. Частицы γ'_{IV} , как и γ'_{III} , фактически относятся по масштабу к наноразмерным [3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенно важны при формировании свойств сплава частицы γ'_{II} и γ'_{IV} . Частицы γ'_{II} – основная упрочняющая фаза. Частицы наноуровня γ'_{IV} заполняют каналы γ -фазы между кубоидами γ'_{II} . Тем самым они создают новый механизм упрочнения суперсплава. Ширина сохраняющихся при этом прослоек γ -фазы не позволяет генерировать в них и проходить по ним дислокациям [3]. Парадоксален тот факт, что выделяющиеся наночастицы γ'_{IV} упрочняют суперсплав в условиях ползучести при высоких температурах. Это явление должно быть использовано для повышения как ресурса, так и параметров эксплуатации суперсплава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвеева Н.М., Козлов Э.В. Упорядоченные фазы в металлических системах. М.: Наука, 1989.
2. Козлов Э.В., Никоненко Е.Л., Конева Н.А., Попова Н.А. // Деформация и разрушение материалов. 2006. № 3. С. 44.
3. Kozlov E.V. Structure and resistance to deformation of UFG metals and alloys, Severe plastic deformation: Toward Bulk Production of Nanostructured Materials / Ed. Burhanettin S. Altan. – USA: Nova Science Publ. Inc., 2006. P. 295.