

Структурные и фазовые превращения в монокристаллах жаропрочных суперсплавов на никелевой основе с высокой объемной долей упрочняющей гамма-штрих фазы под влиянием внешних воздействий

Петрова С.Н., Пилюгин В.П., Виноградова Н.И., Бахтеева Н.Д.



На монокристаллах $\langle 001 \rangle$ никелевых жаропрочных суперсплавов с высокой объемной долей упрочняющей γ' -фазы на основе Ni_3Al , упорядоченной по типу $L1_2$, изучены особенности структурообразования при деформации сдвигом под давлением и последующих рекристаллизационных отжигах

В настоящее время жаропрочные никелевые суперсплавы с объемной долей упрочняющей γ' -фазы более 60% применяются в монокристалльном исполнении в авиационной и теплоэнергетической промышленности. Высокие эксплуатационные свойства изделий из этих сплавов в большей степени обеспечиваются стабильностью фазового и структурного состояния материала в условиях комплексного воздействия высоких температур, напряжений, агрессивных сред и т.д.. В связи с этим, всестороннее изучение структурных и фазовых превращений, возникающих в сплавах от внешних воздействий, представляет интерес, прежде всего научный, однако, некоторые результаты могут иметь и практическое значение.

Исследование проводилось на монокристаллах $\langle 001 \rangle$ никелевых суперсплавов типа ЖС (объемная доля упрочняющей γ' -фазы около 65%) и типа ВКНА с объемной долей γ' -фазы около 90%. Температуры полного растворения упрочняющей фазы равны $\sim 1275^\circ\text{C}$ и $\sim 1300^\circ\text{C}$ соответственно. Интенсивной пластической деформацией под давлением 10 ГПа с углами закручивания φ от 0,25 до 31,4 радиан, степень логарифмической деформации e изменялась при этом от 1,2 до 9, воздействовали на образцы, имеющие различную морфологию γ' -фазы. Для сплава типа ЖС это была либо кубоидная (размер ребра куба $\sim 0,37\text{ мкм}$), либо ламелярная (с поперечным размером ламелей $\sim 0,23\text{ мкм}$) формы упрочняющей фазы

(рис. 1 а,б). Исходная структура сплава типа ВКНА представляла собой γ' -фазу с прослойками γ -твердого раствора (рис. 1в).

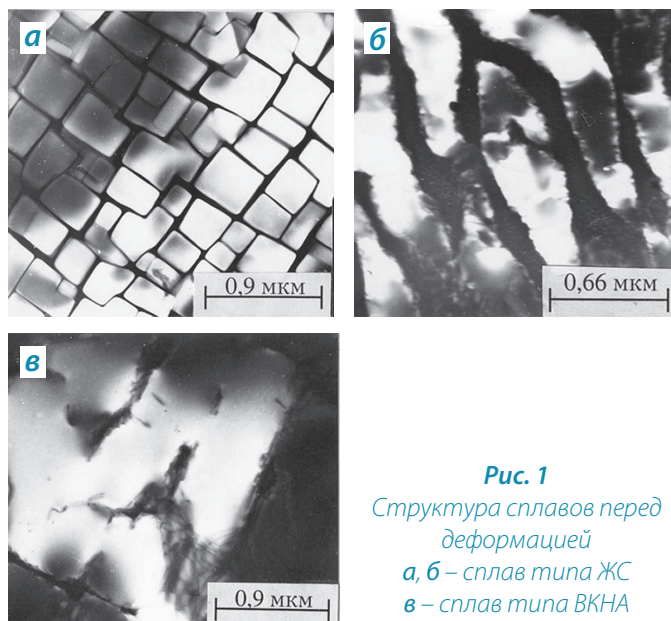


Рис. 1
Структура сплавов перед деформацией
а, б – сплав типа ЖС
в – сплав типа ВКНА

Структура после деформации

Сильная пластическая деформация сдвигом под давлением приводит к формированию в монокристаллах микрокристаллитного (размер $\sim 10\text{ нм}$) однофазного γ -состояния с высокой химической неоднородностью независимо от исходного вида упрочняющей фазы (рис.2). В сплаве типа ВКНА оно формируется во всем объеме деформируемых образцов при более высоких степенях деформации, чем в сплавах типа ЖС. Это связано с большей (в полтора раза) объемной долей γ' -фазы, деформация которой в срав-

нении с γ -фазой более затруднена.

Микротвердость обоих сплавов возрастает с увеличением степени деформации, причем наиболее интенсивный прирост наблюдается на начальных степенях деформирования [1].

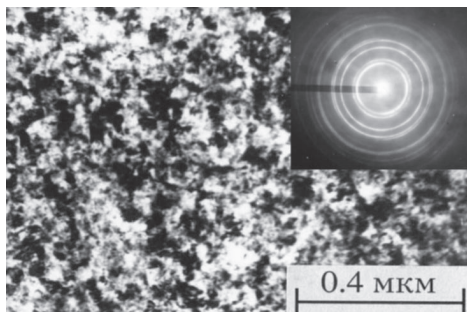


Рис. 2

Типичная структура сплавов после интенсивной пластической деформации

Структура после рекристаллизационных отжигов

В процессе отжига при 700 °С в обоих сплавах начинается рекристаллизация, в тем большей степени, чем продолжительнее отжиг.

Эта температура существенно ниже тех, при которых развивается рекристаллизация после обычно применяемых способов деформирования (прокатка, растяжение и др.).

Появление рекристаллизации при столь низкой температуре обусловлено не только высокой степенью деформации при сдвиге под давлением, но и однофазным состоянием деформированных монокристаллов. Вместе с тем данная температура соответствует двухфазному ($\gamma'+\gamma$) состоянию материалов, поэтому наряду с рекристаллизацией идет формирование γ' -фазы. Размеры γ - и γ' зерен определяются температурой и длительностью нагрева.

В процессе отжига при 1000°С в обоих сплавах образуется более крупнозернистая структура. В сплаве типа ЖС в рекристаллизованных γ -зернах присутствует γ' -фаза в виде небольшого количества крупных, соответствующих данной температуре, частиц и массы мелких частиц, выделившихся при охлаждении (рис.3а,б). В сплаве

типа ВКНА образуются в основном γ' -зерна, но часто в пределах этих зерен сохраняются, отделенные малоугловыми границами, γ -участки, в которых при охлаждении выделяется дисперсная γ' -фаза (рис.3в,г) [2].

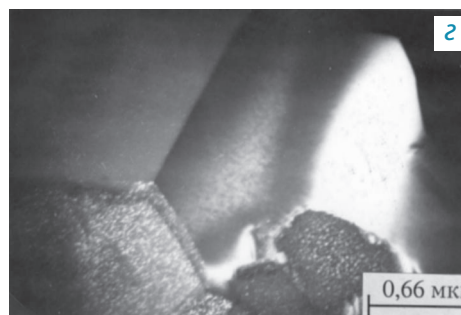
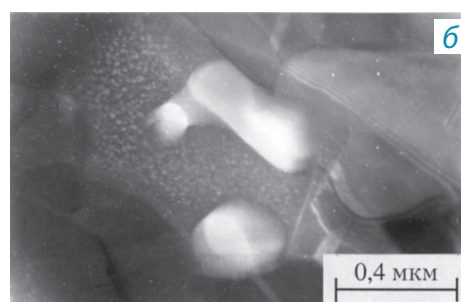
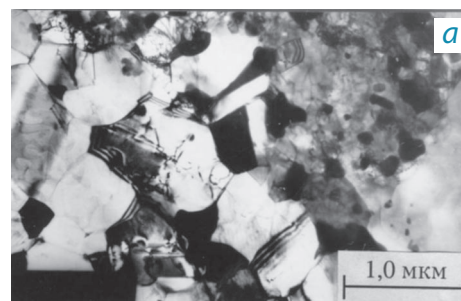


Рис. 3

Структура сплавов после нагрева на 1000°С:

а, б – сплав типа ЖС, время отжига 0,25 ч;

в, г – сплав типа ВКНА, время отжига 0,25 ч;

б, г – темнопольное изображение в рефлексе γ' -фазы

¹ Бахтеева Н.Д., Виноградова Н.И., Петрова С.Н., Пилюгин В.П. *Металловедение и термическая обработка* 19 (2000) 26

² Бахтеева Н.Д., Виноградова Н.И., Петрова С.Н., Пилюгин В.П. *Физика металлов и металловедение* 95 (2003) 104