

© Н.Н. Степанова, Н.В. Казанцева, Д.П. Родионов, Ю.Н. Акшенцев,
Д.И. Давыдов, В.Г. Пушкин, Н.И. Виноградова, 2012 г.
Институт физики металлов УрО РАН
г. Екатеринбург
snn@imp.uran.ru

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ Ni_3Al

Интерметаллическое соединение Ni_3Al со сверхструктурой типа $L1_2$ является основной упрочняющей фазой жаропрочных никелевых сплавов, представляющих важную группу высокопрочных материалов. Эти сплавы применяются для изготовления турбинных лопаток, ответственных и наиболее нагруженных деталей авиационных и стационарных газотурбинных установок. В настоящее время большое внимание уделяется увеличению мощности и КПД газотурбинных установок, что обеспечивается значительным повышением температуры эксплуатации и рабочих напряжений.

Сплавы типа ВКНА на интерметаллидной основе в настоящее время являются самыми высокотемпературными материалами среди никелевых жаропрочных сплавов. Объемная доля фазы на основе Ni_3Al составляет в этих сплавах 90 %. Они обладают уникальным комплексом свойств: высокой прочностью, возможностью эксплуатации монокристаллических изделий при температурах до 1200 °С, стойкостью к окислению, экономичным химическим составом. В литературе подробно описана исходная структура сплавов типа ВКНА в литом состоянии, приводятся отдельные сведения об их механических свойствах, но недостаточно данных о характере деформации таких материалов в высокотемпературной области. Между тем такая информация представляет интерес, в частности, в связи с задачей повышения рабочих температур жаропрочных сплавов до 1250 °С.

Проведено исследование структуры и механических свойств монокристаллических образцов интерметаллического соединения Ni_3Al и сплавов типа ВКНА (90 % упрочняющей γ' -фазы на основе Ni_3Al) при испытаниях на растяжение в интервале температур 1150–1250 °С. Рабочая зона образцов (ГОСТ 9651-84, тип I, № 1) перед испытаниями подвергалась электролитической полировке. Испытания проведены на машине Heckert FP-100/1 при скорости нагружения 1,32 мм/мин. ($2 \cdot 10^{-5}$ м/с).

Монокристаллические $\langle 001 \rangle$ образцы Ni_3Al (75,5 ат. % Ni – 24,5 ат. % Al) в литом и гомогенизированном состоянии (т/о: 1100 °С, 100 ч) в

исследованном интервале температур находятся в состоянии сверхпластичности (табл. 1). В температурном диапазоне 1200–1250 °С деформация сплава Ni_3Al происходит в результате упорядоченного, направленного движения частичных дислокаций типа $a/3\langle 112 \rangle$, сопровождающегося образованием сверхструктурных дефектов упаковки вычитания. Основным механизмом релаксации напряжений является динамический возврат.

Таблица 1

Механические свойства монокристаллических $\langle 001 \rangle$ образцов Ni_3Al

состояние	температура испытаний, °С	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
литой	1150	200	190	55
литой	1200	102	93	155
т/о	1150	143	125	140
т/о	1200	101	98	125
т/о	1250	66	60	110

При этом в удлинение также вносят вклад все другие возможные механизмы релаксации напряжений. Так, в местах выхода на поверхность линий скольжения происходит образование кристаллографических микротрещин, формирующих поверхностную сетку. Вблизи микротрещин наблюдается зона рекристаллизованных зерен. В случае деформации при 1250 °С наряду со сверхструктурными дефектами упаковки вычитания, формирующихся внутри дислокационных петель обнаружены двойники, появление которых можно рассматривать как взаимодействие нескольких сверхструктурных дефектов упаковки вычитания.

Таблица 2

Механические свойства литых образцов типа ВКНА $\langle 001 \rangle$

Сплав	Температура, °С	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
ВКНА-4У	1200	136	130	21
	1250	130	125	25
ВКНА-1В	1200	142	138	18
	1250	120	115	29

Исследование структуры и механических свойств сплавов ВКНА-4У и ВКНА-1В показало, монокристалльные $\langle 001 \rangle$ образцы способны успешно противостоять кратковременному активному нагружению при 1250 °С. Образцы имеют малое равномерное удлинение, при растяжении

практически сразу возникает шейка, в которой сосредоточена вся пластическая деформация. Высокотемпературное нагружение сопровождается процессом релаксации напряжений, для каждой температурной области характерен свой механизм разупрочнения.

При 1100 °С релаксация связана с начальными стадиями рекристаллизации, тогда как при 1200–1250 °С механизмом релаксации является динамический возврат, приводящий к формированию большого числа малоугловых границ. При 1200 °С границы проходят через области твердого раствора, не затрагивая крупные частицы γ' -фазы. Деформация при 1250 °С сопровождается фрагментацией самих частиц интерметаллидной γ' -фазы. При испытаниях на 1250 °С прочностные свойства ВКНА-4У оказываются выше, чем у ВКНА-1В, что обеспечивается наличием кобальта в числе легирующих элементов. За снижение прочностных свойств сплавов типа ВКНА при 1250 °С ответственны нарастающее растворение γ' -фазы и ее фрагментация, в сплаве ВКНА-1В это усугубляется сильной температурной зависимостью модуля нормальной упругости.

Термообработка, направленная на получение максимального количества γ' -фазы, повышает прочность образцов ВКНА-4У при 1100 °С, при 1200 °С свойства т/о образцов существенно снижаются из-за ускоренного растворения упрочняющей фазы.

На уровень прочностных свойств монокристаллических образцов сплавов типа ВКНА значительное влияние оказывает их кристаллографическая ориентация.