

УДК 621.74.045:669.245.018:620.193.53

Канд. техн. наук С. В. Гайдук¹, О. В. Гнатенко², канд. техн. наук А. Г. Андриенко¹,
д-р техн. наук В. В. Наумик¹

¹Национальный технический университет, ²АО «Мотор Сич»; г. Запорожье

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ

Изучена кинетика и динамика структурных превращений при высокотемпературной ползучести образцов жаропрочных никелевых сплавов с монокристаллической макроструктурой. Установлено, что при повышении температуры испытаний механизм сопротивления высокотемпературной ползучести изменяется от перерезания и огибания частиц γ' -фазы дислокациями на переползание дислокаций.

Ключевые слова: жаропрочный никелевый сплав, структурные превращения, длительная прочность, высокотемпературная ползучесть, структура, γ' -фаза, морфология, дислокация, коагуляция.

До настоящего времени литейные жаропрочные никелевые сплавы интенсивно исследуются во всех мировых научных центрах, занимающихся разработкой новых и модернизацией существующих промыш-

ленных сплавов, способных долговременно и надежно работать в условиях влияния агрессивных коррозионных сред при высоких температурах [1, 2].

Структура жаропрочных сплавов представляет со-

бой матрицу с г.ц.к. решёткой, содержащую карбиды и когерентную интерметаллидную γ' -фазу. Свойства сплавов определяются количеством, формой и распределением фаз, а эти параметры зависят от скорости охлаждения при литье и режимов термической обработки [3].

Жаропрочный сплав должен иметь достаточную стабильность структуры и жаропрочность на протяжении расчетного ресурса работы в условиях действия высоких рабочих температур и напряжений [4].

Перспективным направлением на сегодня, как с технической, так и с экономической точки зрения, является разработка экономнолегированных модификаций на основе дорогих промышленных жаропрочных никелевых сплавов, которые имеют значительно меньшую стоимость и эквивалентный уровень показателей механических свойств.

Разработан экономнолегированный жаропрочный никелевый сплав ЖС32Э-ВИ [5] с пониженным содержанием рения и повышенным содержанием тантала, обладающий прочностными свойствами при комнатных и высоких температурах на уровне сплава ЖС32-ВИ, существенно большей стойкостью против высокотемпературной коррозии, применение которого обеспечивает снижение себестоимости ответственных отливок на 40... 45 %.

Целью данной работы является изучение кинетики и динамики структурных превращений при высокотемпературной ползучести опытных образцов жаропрочных никелевых сплавов с монокристаллической макроструктурой.

Химический состав сплава ЖС32-ВИ согласно ОСТ 1.90.126-85 и ЖС32Э-ВИ [5] приведен в таблице 1.

На монокристаллических образцах сплава ЖС32-ВИ и разработанной его экономичной модификации провели исследования динамики структурных превращений в условиях высокотемпературной ползучести с использованием растрового электронного микроско-

па JEOL JSM-6360LA при увеличениях на 1000 и на 5000 раз.

Анализ микроструктуры опытных образцов показал, что после 100-часовых испытаний на долговременную прочность при температурах 800, 900 и 1000 °С при напряжениях, соответственно 620, 450 и 250 МПа соответственно, в условиях высокотемпературной ползучести частицы основной укрепляющей γ' -фазы коагулируют, срастаясь в пластины и приобретают вытянутую форму в виде «рафт»-структуры, преимущественно ориентированной перпендикулярно к оси прилагаемой нагрузки.

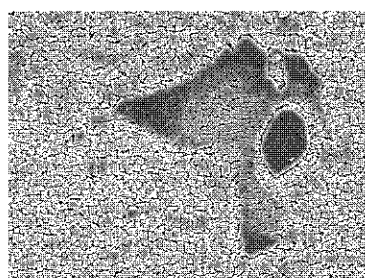
Установлено, что кинетика и динамика формирования структуры существенно зависит от температуры испытания и величины нагрузки. Основная упрочняющая γ' -фаза сплавов – это мелкодисперсные частицы, которые тормозят дислокации и препятствуют развитию высокотемпературной ползучести. При этом частицы γ' -фазы преимущественно коагулируют направлено, вытягиваясь в направлении, перпендикулярном к оси растягивающего напряжения. Однако механизм сопротивления сплавов высокотемпературной ползучести при различных температурах испытаний и напряжений не остается постоянным и одинаковым как по кинетике, так и по динамике термодинамических процессов.

Так, после выдержки на протяжении 100 часов монокристаллических образцов сплава ЖС32-ВИ и разработанного сплава ЖС32Э-ВИ в условиях высокотемпературной ползучести при температуре 800 °С и напряжении 620 МПа «рафт»-структура еще не формируется (рис. 1). В основном, в структуре происходит ненаправленная коагуляция более крупных частиц γ' -фазы, которые не растворились после второй ступени термообработки (низкотемпературной гомогенизации при 1050 °С).

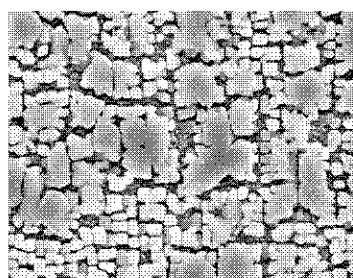
Таблица 1 – Химический состав исследованных жаропрочных никелевых сплавов

Сплав	Массовая доля элементов, %								
	C	Cr	Co	Mo	W	Al	Nb	Ta	Re
ЖС32-ВИ	0,12...0,18	4,3...5,6	8,0...10,0	0,8...1,4	7,7...9,3	5,6...6,3	1,4...1,8	3,5...4,8	3,5...4,5
ЖС32Э-ВИ	0,04...0,10	4,3...5,6	5,0...6,0	0,4...0,8	6,4...7,0	5,6...6,3	0,6...1,0	7,7...8,3	1,7...2,3

Примечание: в сплавах допускается содержание не более (%): 1,0 Fe; 0,025 Ce; 0,06 Zr; 0,035 B; 0,4 Si; 0,01 S; 0,015 P; 0,01 Y; 0,0012 Pb; 0,0005 Bi



× 1000



× 5000

Рис. 1. Типичная структура для сплавов ЖС32-ВИ и ЖС32Э-ВИ, сформировавшаяся в условиях ползучести при 800 °С и напряжении 620 МПа

Постепенно частицы γ' -фазы приобретают неправильную форму, без подавляющей ориентации по отношению к оси прикладываемой нагрузки. Однако наблюдаются незначительные участки сращивания мелкодисперсных частиц γ' -фазы, ориентированных перпендикулярно к направлению действующего напряжения (см. рис. 1).

Для этих условий высокотемпературной ползучести подавляющим является механизм перерезания и огибания частиц γ' -фазы дислокациями, и скорость ползучести зависит как от размера частиц γ' -фазы, так и от расстояния между ними.

В этом случае долговременная прочность обеспечивается преимущественно мелкодисперсными частицами γ' -фазы по размеру (0,20... 0,30 мкм), доведёнными из пересыщенного γ -твердого раствора после второй ступени термической обработки (низкотемпературной гомогенизации при 1050 °C).

После выдержки образцов обоих исследованных сплавов в условиях высокотемпературной ползучести при температуре 900 °C и напряжении 450 МПа анализ микроструктуры показал, что формирование «рафт»-структуры происходит частично, но в большем объеме, преимущественно в зонах, которые окружают выделение эвтектики $\gamma + \gamma'$. Это происходит за счет анизотропного сращивания мелкодисперсных γ' -фазы перпендикулярно направлению растягивающего напряжения (рис. 2).

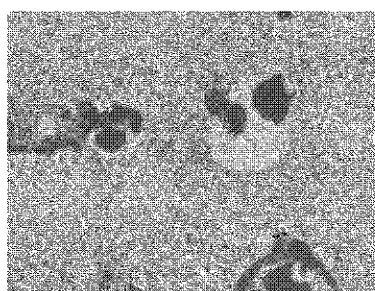
При этом также наблюдается ненаправленная коагуляция более крупных частиц γ' -фазы, которые не растворились после второй ступени термической обработки (низкотемпературной гомогенизации при 1050 °C). Частицы γ' -фазы постепенно приобретают

неправильную форму без подавляющего ориентирования по отношению к направлению действующего напряжения (см. рис. 2).

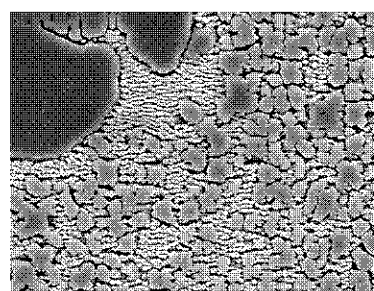
Для этих условий ползучести долговременная прочность для сплавов ЖС32-ВИ и ЖС32Э-ВИ обеспечивается в большей степени оптимальным размером частиц γ' -фазы (0,40... 0,60 мкм), сформировавшихся после первой ступени термической обработки (высокотемпературной гомогенизации при 1280 °C и 1270 °C, соответственно).

Анализ микроструктуры после выдержки образцов обоих сплавов в условиях высокотемпературной ползучести при температуре 1000 °C и напряжении 250 МПа показал, что морфология частиц основной укрепляющей γ' -фазы полностью изменяется. Вместо кубически-сферической морфологии они приобретают вытянутую форму в направлении, перпендикулярном к действию растягивающего напряжения. Происходит полное формирование «рафт»-структуры в результате анизотропной (направленной) коагуляции частиц основной укрепляющей γ' -фазы, и потеря ими начальной (более правильной) геометрической формы (рис. 3).

Установлено, что «рафт»-структура в монокристаллических образцах обоих сплавов преимущественно формируется на первой стадии ползучести на протяжении нескольких десятков часов, за счет большей растворимости частиц γ' -фазы в γ -твердом растворе и значительного ускорения диффузионных процессов. При этом часть оставшейся объемной доли γ' -фазы деградирует на второй стадии ползучести. Начиная с середины второй стадии ползучести, деградация частиц γ' -фазы в структуре образцов обоих сплавов достигает 60... 80 % (см. рис. 3).

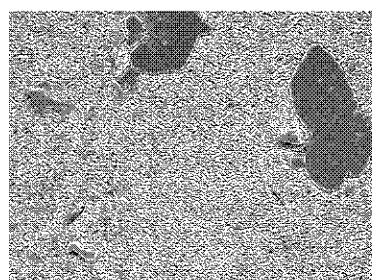


× 1000

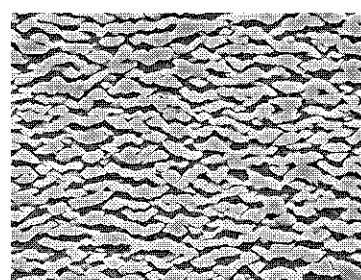


× 5000

Рис. 2. Типичная структура для сплавов ЖС32-ВИ и ЖС32Э-ВИ, сформировавшаяся в условиях ползучести при 900 °C и напряжении 450 МПа



× 1000



× 5000

Рис. 3. Типичная структура для сплавов ЖС32-ВИ и ЖС32Э-ВИ, сформировавшаяся в условиях ползучести при 1000 °C и напряжении 250 МПа

Для этих условий ползучести подавляющим является механизм переползания дислокаций, что и определяет скорость ползучести монокристаллических образцов исследованных сплавов.

В этом случае долговременная прочность обеспечивается преимущественно частицами γ' -фазы большого размера (0,60... 0,70 мкм), которые формируются после проведения двух ступеней термической обработки (высокотемпературной и низкотемпературной гомогенизации).

Выводы

Изучена кинетика и динамика структурных превращений при высокотемпературной ползучести образцов жаропрочных никелевых сплавов с монокристаллической макроструктурой. Установлено, что при повышении температуры испытания от 800 до 900 °С и снижении напряжения от 620 до 450 МПа постепенно увеличивается степень ненаправленной коагуляции частиц γ' -фазы, а при 1000 °С и 250 МПа частицы γ' -фазы приобретают вытянутую форму в направлении, перпендикулярном к действию растягивающего напряжения, формируются «рафт»-структуры. При этом

механизм сопротивления высокотемпературной ползучести образцов жаропрочных сплавов изменяется от перерезания и огибания частиц γ' -фазы дислокациями на переползание дислокаций.

Список литературы

1. Бобылёв А. В. Механические и технологические свойства металлов : справочник / А. В. Бобылёв. – М. : Металлургия, 1980. – 296 с.
2. Воздвиженский В. М. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении / В. М. Воздвиженский, В. А. Грачёв, В. В. Спасский. – М. : Машиностроение, 1984. – 432 с.
3. Декер Р. Ф. Металловедение сплавов на никелевой основе / Декер Р.Ф., Симе Ч.Т. // Жаропрочные сплавы ; [пер. с англ.]. – М. : Металлургия, 1976. – С. 39–82.
4. Технические требования к перспективным материалам высокотемпературных ГТУ. Ч. 1 // Лопатки турбин, камеры сгорания. – Л. : НПО ЦКТИ, 1986. – 28 с.
5. Пат. 48242, Україна, МПК⁶ C22C19/05. Ливарний жароміцний нікелевий сплав / [А. Д. Коваль, А. Г. Андрієнко, С. В. Гайдук та ін.] : заявник і патентовласник Запорізький нац. техн. ун-т ; заявл. 21.09.2009, № u 200909668 ; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 5. – 8 с.

Одержано 24.09.2012

Гайдук С.В., Гнатенко О.В., Андрієнко А.Г., Наумик В.В. Дослідження структурних перетворень жароміцних нікелевих сплавів в умовах повзучості

Досліджено кінетику та динаміку структурних перетворювань під час високотемпературної повзучості зразків жароміцних нікелевих сплавів з монокристалічною макроструктурою. Встановлено, що при підвищенні температури випробувань механізм опору високотемпературній повзучості змінюється з пере різання та огинання часток γ' -фазы дислокаціями на переповзання дислокацій.

Ключові слова: жароміцний нікелевий сплав, структурні перетворювання, довготривала міцність, високотемпературна повзучість, структура, γ' -фаза, морфологія, дислокація, коагуляція.

Gayduk S., Gnatenko O., Andrienko A., Naumik V. Investigation of structural transformations heat-resistant nickelbase superalloys under creep

The kinetics and dynamics of structural transformations in the high-temperature creep of nickelbase superalloys samples with a single-crystal macrostructure was investigated. It was found that with test temperature increasing the resistance of high-temperature creep mechanism changes from cutting and rounding the particles γ' -phase by the dislocations to the climb of dislocations.

Key words: nickelbase superalloy structural transformation, long-term strength, high temperature creep, structure, γ' -phase, morphology, dislocation, coagulation.