

М. А. КАБЛУКОВСКАЯ, Б. М. МОГУТНОВ

**О РОЛИ УПОРЯДОЧЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ СТАРЕНИЯ
МАРТЕНСИТА СПЛАВОВ Fe — Ni — Co — Mo**

(Представлено академиком Г. В. Курдюмовым 29 V 1974)

Начальные стадии старения мартенсита безуглеродистых Fe — Co — Mo сплавов характеризуются возникновением областей ближнего порядка (¹⁻⁵), образованием выделений ω -фазы (^{2, 6, 7}) и явлениями возврата (^{8, 9}). Наиболее ранним процессом является упорядочение (¹⁻⁵), которое существенно изменяет термодинамические свойства раствора и условия для выделения интерметаллических фаз, а именно стимулирует образование соединений на основе никеля и затрудняет образование соединений железа (¹⁰).

Возникает вопрос: в какой связи находятся другие особенности начальных стадий старения Fe — Ni — Co — Mo сплавов с упорядочением? В выяснении этого и заключалась цель настоящей работы.

Составы исследованных сталей приводятся в табл. 1.

Т а б л и ц а 1
Составы исследованных сплавов

Марка	Содержание элементов, вес. %		
	Ni	Co	Mo
H16K15	16,0	14,85	—
H16K10M5	16,05	10,0	5,25
H16K15M5	16,05	14,85	5,03
H16M5	15,90	—	4,95
H16M8	15,95	—	8,10

П р и м е ч а н и е. Fe — дополнение до 100%.

Образцы, закаленные в воде после нагрева при 1000° С в течение 1 часа, подвергались отжигу различной продолжительности при 420° в температурном интервале упорядочения. При этом в сплавах, содержащих кобальт, достигалась определенная степень ближнего порядка. Затем в калориметре измерялись тепловые эффекты последующих стадий старения. Для измерений использовался метод «кажущейся» теплоемкости, не отличающийся от описанного ранее (¹¹). Часть полученных результатов представлена на рис. 1.

В закаленном сплаве H16K15 (рис. 1, 1-3), который не содержит элементов, образующих интерметаллические соединения, в интервале 300—500° наблюдается уменьшение «кажущейся» теплоемкости (рис. 1, 1), обусловленное протеканием процесса упорядочения (^{5, 12}). Выдержка при 420° в течение 1 часа приводит к почти полному исчезновению указанной аномалии теплоемкости (рис. 1, 2), что свидетельствует о практически полном завершении процесса в период предварительного отжига при 420°.

Подобное наблюдается и в сплавах Н16К10М5 и Н16К15М5 (рис. 1, 4–7). Здесь в закаленном состоянии фиксируются две стадии тепловыделения: высокотемпературная, связанная с выделением интерметаллической фазы Fe_2Mo , и низкотемпературная, обусловленная упорядочением (², ⁵). Однако в отличие от сплава Н16К15 исчезновение экзотермического эффекта ближнего порядка приводит к другой аномалии теплоемкости, а именно к ее возрастанию, которое происходит в интервале 400–500°

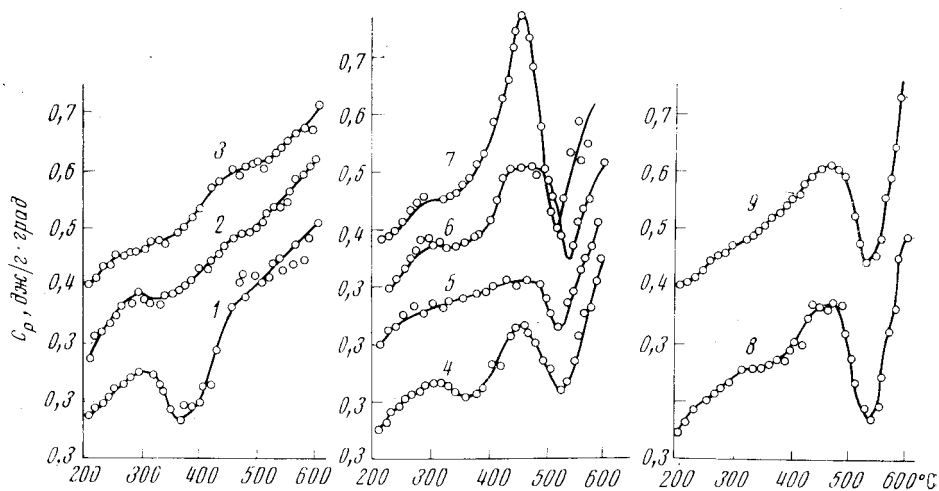


Рис. 1. Изменение «кажущейся» теплоемкости c_p сталей Н16К15 (1–3), Н16К10М5 (4–7) и Н16М8 (8, 9) после различных видов термообработки: 1, 4, 8 – закалка с 1000°; 2, 5 – закалка с 1000° и отжиг при 420° в течение 1 часа; 3, 6, 9 – закалка с 1000° и отжиг при 420° в течение 10 час.; 7 – закалка с 1000° и отжиг при 420° в течение 24 час.

(рис. 1, 6, 7). Прирост теплоемкости увеличивается с увеличением времени предварительного отжига при 420°. Указанное явление отсутствует в сплавах Н16М5 и Н16М8, не содержащих кобальта (рис. 1, 8, 9). При нагреве этих сплавов в закаленном состоянии упорядочения не происходит, а небольшое по величине тепловыделение при 320–420° обусловлено процессами типа деформационного старения (⁵). Предварительный отжиг при 420° приводит лишь к исчезновению соответствующего минимума «кажущейся» теплоемкости (рис. 1, 9).

Таким образом, полученные данные позволяют заключить, что возрастание теплоемкости, наблюдающееся в интервале 400–500° в сплавах Н16К10М5 и Н16К15М5, является следствием ближнего упорядочения. Этот эффект говорит о протекании эндотермического процесса растворения метастабильных продуктов распада твердого раствора, образовавшихся во время предварительного отжига. Некоторые выводы о природе этих продуктов можно сделать по данным (²⁻⁴, ⁶, ⁷, ¹³).

В (²⁻⁴) методом ядерного γ -резонанса показано, что кратковременные выдержки в интервале 400–500° приводят к почти полному исчезновению атомов железа, имеющих в качестве ближайших соседей атомы молибдена. Это свидетельствует о возрастании числа связей Ni–Mo. Более продолжительная выдержка (~16 час.) при 420–440° приводит к появлению выделений ω -фазы, обогащенной никелем и молибденом (², ⁶, ⁷).

Равновесная фаза Fe_2Mo образуется при более высокой температуре (~520°) или в результате длительных отжигов при 500° (²⁻⁴, ⁶, ⁷). В сплавах типа Н16М5 и Н16М8 выделений ω -фазы не наблюдается, а в результате старения сразу же образуется конечный продукт Fe_2Mo (⁶, ⁷, ¹³).

Перечисленное позволяет заключить, что эндотермический тепловой эффект обусловлен растворением образовавшихся при предварительном

отжиге выделений ω -фазы, которая, по-видимому, представляет собой соединение никеля и молибдена (^{2, 7}).

Эти результаты находятся в полном соответствии с ожидаемым влиянием упорядочения на условия выделения интерметаллических соединений. Очевидно, эта фаза является метастабильной. Верхней границей ее существования в исследованных сплавах можно считать температуру максимума теплоемкости ($\sim 450^\circ$).

Одновременное существование эффекта растворения ω -фазы и экзотермического эффекта выделения равновесного соединения Fe_2Mo свидетельствует, что переход к равновесному выделению в изученных материалах осуществляется путем растворения одних выделений и зарождения других, а не путем перестройки кристаллической решетки. В данном случае это представляется естественным, так как метастабильная и равновесная фазы имеют, по-видимому, существенно различный состав.

Температура, соответствующая максимальному значению «кажущейся» теплоемкости, практически совпадает с температурой, выше которой явления возврата в сплавах $Fe-Ni-Co-Mo$ практически не наблюдаются (^{8, 9}). Отсюда следует, что указанные явления связаны с растворением ω -фазы. Этот вывод согласуется с (¹⁴). Можно полагать, что возврат обусловлен уменьшением растворимости ω -фазы с увеличением температуры, а максимальная степень возврата наблюдается при переходе через верхнюю границу существования этого соединения.

Таким образом, результаты настоящей работы позволяют заключить, что такие особенности старения безуглеродистого мартенсита на железоникель-кобальтовой основе, как образование промежуточной ω -фазы и возврат, являются следствием упорядочения.

Институт металловедения и физики металлов
Центрального научно-исследовательского
института черной металлургии
им. И. П. Бардина
Москва

Поступило
24 V 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ H. J. Rack, D. Kalish, Metallurgical Trans., v. 2, 3011 (1971). ² М. Д. Перкас, П. Л. Грузин и др., Металловед. и термич. обработка металлов, № 10, 2 (1972).
³ П. Л. Грузин, Ю. Л. Родионов и др., ДАН, т. 202, 316 (1972). ⁴ П. Л. Грузин, Ю. Л. Родионов и др., ДАН, т. 204, 328 (1972). ⁵ М. А. Каблуковская, Б. М. Мозунов, Физ. мет. и металловед., т. 35, 791 (1973). ⁶ А. Ф. Еднерал, О. П. Жуков, М. Д. Перкас, Металловед. и термич. обработка металлов, № 4, 9 (1971). ⁷ А. Д. Еднерал, М. Д. Перкас, Физ. мет. и металловед., т. 33, 315 (1972). ⁸ P. T. Peters, Trans. Met. Soc. AIME, v. 239, 1981 (1967). ⁹ Е. А. Алексеенко, Г. П. Кулиничев, М. Д. Перкас, Физ. мет. и металловед., т. 29, 335 (1970). ¹⁰ Б. М. Мозунов, там же, т. 38, 260 (1974). ¹¹ В. П. Иткин, Б. М. Мозунов, Л. А. Шварцман, там же, т. 21, 732 (1966).
¹² А. Ф. Еднерал, О. П. Жуков и др., там же, т. 36, 727 (1973). ¹³ А. Ф. Еднерал, М. Д. Перкас, там же, т. 28, 862 (1969). ¹⁴ П. Л. Грузин, Ю. А. Родионов и др., там же, т. 36, 423 (1973).