

Член-корреспондент АН СССР А. Т. ТУМАНОВ, К. И. ПОРТНОЙ

НОВЫЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЖАРОПРОЧНОСТИ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Современные жаропрочные никелевые сплавы, полученные путем сложного легирования, интерметаллидным и карбидным упрочнением, используются при температурах 900—1000° С. Для создания жаропрочных сплавов на рабочую температуру 1100—1200° необходимы принципиально новые технические решения. За последние несколько лет у нас и за рубежом наметилось новое направление в изыскании высокожаропрочных никелевых сплавов (¹, ²), т. е. композиционных материалов.

В настоящей статье рассматривается новый класс подобных материалов — дисперсноупрочненных жаропрочных никелевых сплавов, отличающихся от обычных, применяющихся в технике дисперсионотвердеющих сплавов по составу, природе упрочнения и методам изготовления. Эти опытные сплавы за рубежом известны под марками ТД-никель, ТД-нихром и др., у нас в Союзе — сплавы ВДУ-1, ВДУ-2 и др., разработанные под руководством авторов *. В этих сплавах основой является чистый никель или малолегированный твердый раствор, а упрочнителями — тонкодисперсные частицы тугоплавких окислов или их сложные соединения.

Содержание упрочняющей фазы в материале примерно 2—5 об. %. По строению эти материалы отличаются микрогетерогенной структурой с сильно развитой поверхностью раздела фаз. Технология получения подобных материалов заключается в осаждении гидроокисей из растворов азотнокислых солей карбонатом аммония, переводе осадков в смесь окислов, селективном восстановлении с последующим формованием заготовок из порошковой шихты. Дальнейший процесс заключается в экструзии заготовок и последующей их обработке давлением (прессование, волочение, штамповка, прокатка и др.).

Рассмотрим два класса жаропрочных материалов: дисперсионотвердеющие (давно известные в технике) и новые — дисперсноупрочненные, которые отличаются параметрами дисперсности частиц — размером и характером распределения дисперсных фаз упрочнителей. На электронных микроструктурах при 10 000 × видно, что до испытаний размеры упрочнителей у высоколегированных жаропрочных стареющих сплавов составляют 2000—3000 Å (рис. 1а). После длительных испытаний (100 час. при 1000°) частицы коагулируют, увеличиваясь в размерах примерно в два раза (рис. 1б) за счет протекания раствороно осадительного процесса укрупнения частиц. В дисперсноупрочненных материалах размеры дисперсных частиц упрочнителей составляют 400—600 Å и практически не изменяются после 500—1000 час. испытаний при температуре 1100° (рис. 1в и 1г), т. е. эти сплавы отличаются высокой термической стабильностью структуры.

Таким образом, главной особенностью описываемого метода получения высокожаропрочных материалов является возможность выбора таких упрочняющих фаз, которые обеспечивают высокую термическую устойчивость в матрице, т. е. способность не разлагаться, не растворяться в матрице и не коагулировать при рабочих температурах.

* Участниками разработки дисперсноупрочненных сплавов являются Б. Н. Бабич, В. И. Люкевич, Е. Н. Тимофеева и др.

Дисперсные частицы упрочнителей, с одной стороны, являются источниками образования дислокаций, а с другой, они служат барьерами на пути движения дислокаций. При наличии инертных нерастворяющихся

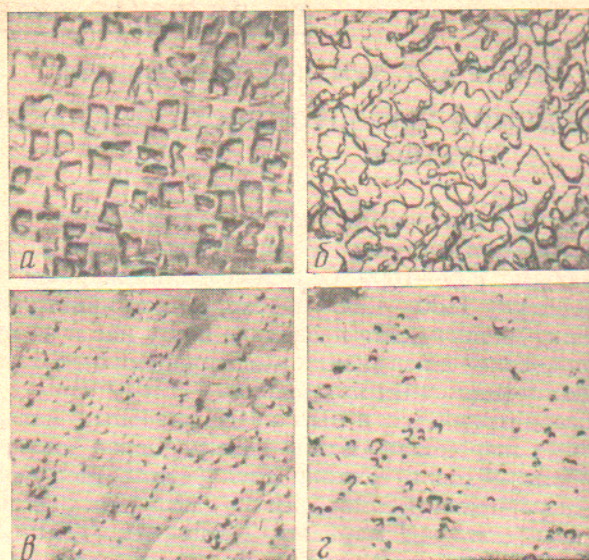


Рис. 1. Электронные микроструктуры дисперсионно-твердеющего сплава до испытания (а), после 100 час. испытаний при 1000° (б) и дисперсноупрочненного сплава до испытания (в), после 500 час. испытаний при 1100° (г). 10 000×

дисперсных частиц их упрочняющий эффект заключается не только в образовании структурных дислокаций на границах раздела, но, главным образом, в сопротивлении движению дислокаций за счет малых расстояний между частицами и, можно предположить, в результате образования полей напряжений вокруг частиц.

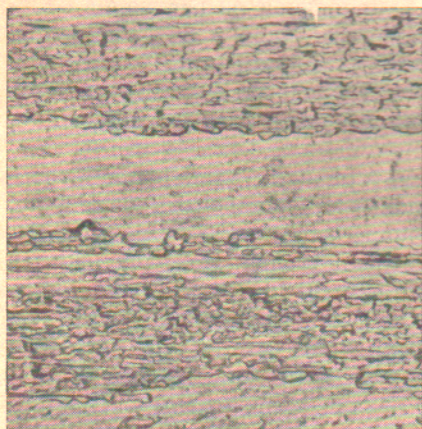


Рис. 2. Микроструктура дисперсноупрочненного сплава после отжига в течение 2 час. при 1400°, 500×

По нашим данным, наибольший эффект упрочнения никеля при 1100° достигается, когда размеры равномерно распределенных частиц упрочнителя составляют 300—600 Å, а расстояние между частицами 0,5—0,8 м.

Общепринятое для обычных деформированных сплавов понятие о рекристаллизации как методе получения разупрочненного, равновесного состояния не приемлемо для дисперсноупрочненных материалов. Нами установлен в указанных материалах особый характер рекристаллизации, заключающийся в том, что последняя полностью не завершается при нагреве почти до температуры плавления матрицы. Кроме того, рекристаллизация распространяется не по всему объему, а зонально, образуя структуру чередующихся рекристаллизованных и нерекристаллизованных зон, ориентированных в направлении обработки (рис. 2).

Никель, упрочненный 2—3% дисперсных частиц, по данным (3) рекристаллизуется лишь локально, а по данным (4) не рекристаллизуется даже после часового отжига при 1370°. Высокое сопротивление ползучести и рекристаллизации вызвано не только присутствием дисперсных фаз, но и является результатом проведения специальной обработки давлением —

холодной деформации и создания кристаллографической текстуры обработки. Механические свойства при комнатной и высоких температурах также зависят не только от содержания дисперсных упрочнителей и их индивидуальных свойств, но и от специальных термомеханических режимов обработки, обеспечивающих создание оптимальной структуры.

Рентгеноструктурные и электронно-скопические исследования позволили сделать предварительное заключение об оптимальной исходной до испытания на жаропрочность структуре дисперсно-упрочненных сплавов. В результате холодной деформации формируется текстура матрицы и происходит скопление дислокаций, а при отжиге, по-видимому, их полигональное распределение. Оптимальной структурой, при которой достигается высокая жаропрочность, является полосчатая с чередующимися рекристаллизованными и нерекристаллизованными зонами.

На рис. 3 приведены зависимости длительной прочности дисперсноупрочненного сплава ВДУ-1 от времени t и температуры T соответственно. По уровню рабочих температур указанный сплав на образцах, вырезанных из прутков, превосходит по свойствам при температурах выше 1050° все известные никелевые сплавы и не уступает свойствам зарубежных сплавов типа ТД-никель. До 1000° дисперсионотвердеющие сплавы имеют преимущества перед новыми сплавами по кратковременной и длительной прочности. На рис. 3 видно, что дисперсноупрочненные сплавы могут стабильно работать длительное время при высоких температурах ($1050-1200^\circ$) и дают возможность расширить температурные пределы применения никелевых сплавов.

Современные листовые материалы используются в промышленности только до 1000° , так как при 1100° у них низкая длительная прочность ($1,5-2,0$ кг/мм² за 100 час.). За рубежом рекомендуется для листов сплав ТД-никель на рабочую температуру $1100-1200^\circ$. Нашими работами показана возможность замены токсичной двуокиси тория в сплаве ТД-никель другими нетоксичными кислородными соединениями (сплав ВДУ-2). Указанный сплав имеет высокую жаропрочность, в два — три раза превышающую жаропрочность существующих сплавов для листов при 1100° .

Дисперсное упрочнение приобретает большое значение в связи с реальной возможностью повышения жаропрочности этим методом практически всех металлов и сплавов на основе никеля, кобальта, железа, хрома, титана, циркония, ниобия, молибдена и др.

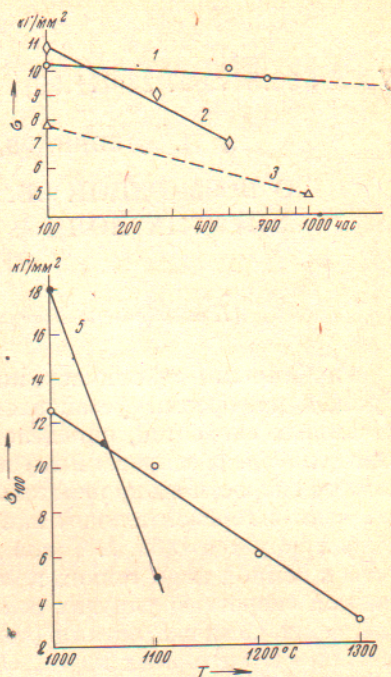


Рис. 3. Зависимость длительной прочности от продолжительности (1, 2, 3) и температуры (4, 5) испытания: 1 — дисперсноупрочненный сплав, $T = 1100^\circ$; 2 — дисперсионотвердеющий, $T = 1050^\circ$; 3 — MAR-M246, $T = 1090^\circ$; 4 — дисперсноупрочненный; 5 — дисперсионотвердеющий сплав

Поступило
22 VII 1970

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ К. И. Портной, А. Т. Туманов, В сборн. Структура и свойства жаропрочных металлических материалов, М., 1970, стр. 55. ² Современные композиционные материалы, под ред. Крока и Броутмана, М., 1970. ³ E. R. Kimmel, M. C. Inman, Am. Soc. Metals Trans. Quart. 62, № 2, 390 (1969). ⁴ G. S. Doble, R. J. Quigg, Trans. AIME, 233, № 2, 410 (1965).