

Член-корреспондент АН СССР Е. М. САВИЦКИЙ, А. И. НАКОНЕЧНИКОВ,
Г. С. БУРХАНОВ, Т. В. ТЕТЮЕВА

ПОВЕДЕНИЕ УГЛЕРОДА В МОНОКРИСТАЛЛАХ МОЛИБДЕНА И СПЛАВА МОЛИБДЕН + 47 вес. % РЕНИЯ

Сплавы молибдена и вольфрама с рением, близкие к пределу насыщения твердого раствора, обладают повышенным сопротивлением к термодинамическим воздействиям, что связано с одновременным возрастанием пластичности и прочности W и Mo по мере легирования их Re ^(1, 2). Так как наиболее вредной примесью, отрицательно сказывающейся на меха-

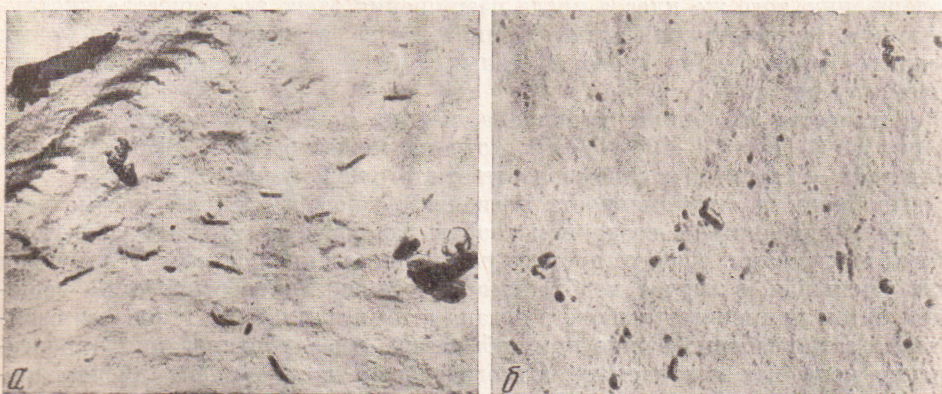


Рис. 1. Характер расположения карбидной фазы (Mo_2C) в структуре монокристаллов Mo (а) и сплава Mo + 47 вес. % Re (б). 14000 $\times$

нических свойствах W и Mo, является углерод, интересно изучить особенности поведения углерода в сплавах Mo и W с Re. Один из авторов этой статьи связывает ⁽³⁾ природу рениевого эффекта с уменьшением чувствительности W и Mo к углероду вследствие большей растворимости его в рении.

В настоящей работе особенности расположения углерода в монокристаллах Mo и сплава Mo + 47 вес. % Re изучали методами электронной микроскопии и автордиографии. Кроме того, методом радиоактивных изотопов исследовали диффузионную подвижность углерода в Mo и сплаве Mo + 47 вес. % Re, а также в Re. Исходное содержание C в исследуемых образцах не превышало 0,01 вес. %.

По данным электронной микроскопии легирование Mo рением существенно меняет характер распределения, форму и количество карбидных включений. В монокристалле Mo карбиды Mo_2C очень неравномерно расположены как по субграницам, так и в поле субзерен (рис. 1а). Наряду с крупными карбидами имеется большое количество мелких, близко расположенных включений пластинчатой формы. Следует отметить, что в областях, непосредственно прилегающих к субграницам, обогащенным карбидными выделениями, карбиды не наблюдались. В монокристалле сплава Mo + 47 вес. % Re по субграницам карбиды отсутствовали (рис. 1б). Они располагались в форме глобул равномерно по образцу, причем количество их и размеры значительно уменьшились по сравнению с исходным монокристаллическим молибденом.

Результаты электронномикроскопического анализа монокристаллов Мо и сплава Мо + 47 вес.% Re подтверждаются данными автордиографического исследования этих же образцов. В молибдене С распределен крайне неравномерно (рис. 2а). Он расположен в виде крупных карбидных скоплений как по границам субзерен различных порядков, так и в поле субзерен на дислокациях. Имеется большое соответствие между представленными автордиограммами и структурами, полученными методами световой и электронной микроскопии.

На автордиограммах монокристалла сплава Мо + 47 вес.% Re обращает на себя внимание однородное почернение пленки (рис. 2б), что указывает на относительно равномерное распределение С в структуре. Мож-

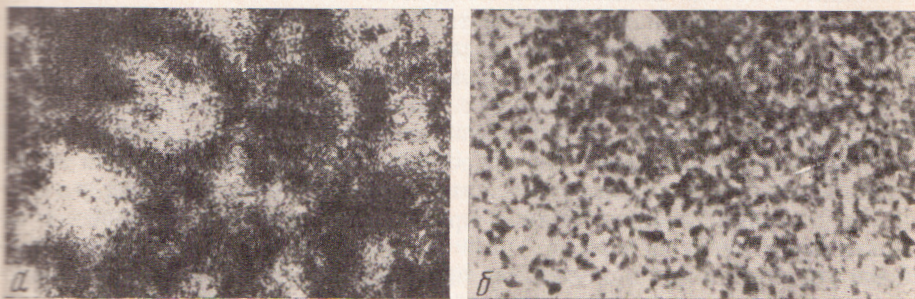


Рис. 2. Перераспределение углерода при легировании монокристалла молибдена рением. а — монокристалл Мо, б — монокристалл сплава Мо + 47 вес.% Re. 50×

но предположить, что большая часть С находится в твердом растворе, а избыток в виде очень мелкодисперсных равномерно расположенных по образцу карбидов.

Таким образом, по данным автордиографического и электронномикроскопического исследований легирование молибдена рением приводит к равномерному распределению С по образцу, увеличению его растворимости, сфероидизации оставшейся карбидной фазы и уменьшению ее размеров и количества. Все это значительно облегчает движение дислокаций, снижает концентрацию напряжений и вероятность образования микротрещин вблизи включений.

Наряду с неметаллическими включениями подвижность дислокаций и вероятность образования различного рода дислокационных скоплений определяется также в значительной степени и диффузионной подвижностью примесей внедрения (в нашем случае, атомов углерода в твердом растворе). В связи с этим нами изучалась подвижность углерода в монокристаллах сплава Мо + 47 вес.% Re с использованием β -излучения радиоактивного углерода С-14 в температурном интервале 1200—1600°С. Значение коэффициента диффузии углерода в молибдене было определено ранее одним из нас в (*). Относительная ошибка в измерении коэффициента диффузии составляла 12%. На рис. 3 представлены коэффициенты диффузии углерода в Мо, сплаве Мо + 47 вес.% Re и в чистом Re. Диффузионная подвижность углерода в сплаве Мо + 47 вес.% Re превышает скорость диффузии С в молибдене примерно на один порядок, а в рении — на два порядка.

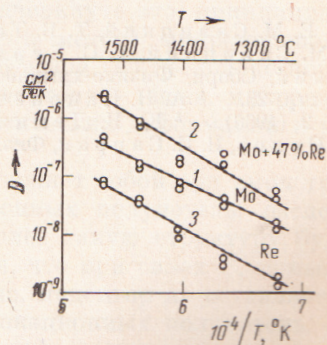


Рис. 3. Температурная зависимость диффузионной подвижности углерода в Мо (1), сплаве Мо + 47 вес.% Re (2) и Re (3)

Значения коэффициентов диффузии для Mo и Re получены на поликристаллических образцах. Для монокристаллической структуры эти значения были бы еще ниже. Экспериментальные значения коэффициентов диффузии углерода могут быть представлены в виде следующих уравнений:

для Mo	$D = 2,04 \cdot 10^{-2} \exp(-41\,000/(RT)),$
для сплава Mo + 47 вес.% Re	$D = 5,62 \cdot 10^{-1} \exp(-58\,500)/(RT).$
для Re	$D = 5,62 \cdot 10^{-1} \exp(-58\,500).$

Значения частотного фактора и энергии активации были рассчитаны с использованием метода наименьших квадратов.

Низкая диффузионная подвижность C в молибдене способствует образованию атмосфер Коттрелла на дислокациях. Значительное увеличение подвижности углерода в монокристалле сплава Mo + 47 вес.% Re препятствует образованию дислокационных скоплений при термоциклическом воздействии (¹, ²). По-видимому, легкостью прохождения дислокаций из-за отсутствия примесных барьеров, сфероидизацией карбидной фазы и уменьшением ее количества можно объяснить прямолинейный характер дислокационных линий, наблюдавшийся при электронномикроскопических исследованиях структуры сплава Mo + 47 вес.% Re (³). Измерение внутреннего трения сплава Mo + 47 вес.% Re также указывает на уменьшение энергии взаимодействия примесей внедрения с дислокациями (⁴).

Таким образом, возрастание пластичности Mo при легировании его Re можно связать с увеличением растворимости C, сфероидизацией оставшейся мелкодисперсной карбидной фазы, уменьшением ее количества, а также с увеличением диффузионной подвижности углерода.

Институт металлургии им. А. А. Байкова
Академии наук СССР
Москва

Поступило
15 VI 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Е. М. Савицкий, Т. В. Тетюева, Н. Н. Раскатов, ДАН, 175, № 2 (1970).
² Е. М. Савицкий, Г. С. Бурханов и др., ДАН, 198, № 2 (1971). ³ Е. М. Савицкий, Сборн. Физико-химические исследования жаропрочных сплавов, «Наука», 1968, стр. 23. ⁴ А. Н. Наконечников, Л. В. Павлинов, В. Н. Быков, ФММ, 22, в. 2 (1966). ⁵ Ю. Н. Демкин, ДАН, 160, № 1 (1966). ⁶ Г. А. Береснев, Л. Г. Орлов, В. И. Саррак, Физ. мет. и металловед., 27, в. 4, 738 (1969).