

УПРОЧНЯЮЩИЕ ФАЗЫ В СПЛАВАХ W-RE: МЕХАНИЗМЫ, СВОЙСТВА И ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ

© А.М. Казаков, Ж.Г. Рахматуллина, А.Р. Халиков, Ю.Р. Шарапова, С.В. Дмитриев

Сплавы системы W-Re представляют собой уникальные тугоплавкие материалы, которые демонстрируют отличные механические свойства и высокую термическую стабильность. Упрочнение этих сплавов достигается за счет формирования различных фаз, таких как карбиды, оксиды и интерметаллиды, которые повышают прочность, пластичность и устойчивость к термическим нагрузкам. Цель данного обзора – обобщить современные данные о типах упрочняющих фаз, их механизмах образования и влиянии на механические свойства и температурную стабильность сплавов W-Re. Рассматриваются ключевые аспекты упрочнения, включая дислокационные механизмы, твердофазное взаимодействие и стабилизацию микроструктуры при высоких температурах. Обсуждаются перспективы использования сплавов W-Re в экстремальных условиях и направления дальнейших исследований для повышения их эксплуатационных характеристик.

Ключевые слова: вольфрам, рений, интерметаллиды, упрочнение, высокая температура.

Введение. Вольфрам (W) и его сплавы широко используются в термоядерных реакторах, броневой снарядной, соплах ракетных двигателей, сварочных электродах, инструментах для сварки трением и других компонентах, работающих в условиях высоких температур [1, 2]. Эти материалы обладают рядом превосходных свойств, таких как высокая температура плавления, отличная теплопроводность и электропроводность, устойчивость к распылению и высокая прочность при высоких температурах [3, 4]. Однако их низкая пластичность при комнатной температуре, хрупкость при переходе из хрупкого в пластичное состояние и склонность к рекристаллизационной хрупкости ограничивают срок службы [5].

Добавление рения (Re) в матрицу вольфрама решает эти проблемы: сплавы W-Re демонстрируют повышенную прочность и улучшенную пластичность при комнатной температуре. Согласно бинарной фазовой диаграмме W-Re [6] растворимость Re в W достигает максимума в 37 ат.% при 3000°C и минимума в 28 ат.% при 1600°C.

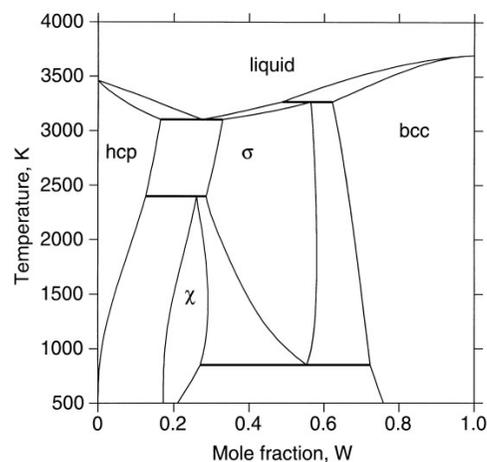


Рис. 1. Фазовая диаграмма сплава W-Re, полученная с помощью термодинамического описания CALPHAD [7]. Взято из работы [6]

Превышение содержания Re в 26 вес.% приводит к образованию хрупкой фазы W_2Re_3 , ухудшающей механические свойства сплава. Поэтому состав W-Re сплавов ограничивается 26 вес.% содержания рения. Сплавы с содержанием Re 1–3 вес.% обладают лучшей пластично-

КАЗАКОВ Арсений Максимович, Уфимский университет науки и технологий,

e-mail: ezabfarm@mail.ru

РАХМАТУЛЛИНА Жанна Геннадьевна – к.ф.-м.н., Уфимский университет науки и технологий,

e-mail: ishmitovazhanna@mail.ru

ХАЛИКОВ Альберт Рашитович – к.ф.-м.н., Уфимский университет науки и технологий,

e-mail: khalikov.albert.r@gmail.com

ШАРАПОВА Юлия Равильевна, Уфимский университет науки и технологий, e-mail: ulya_usinsk@mail.ru

ДМИТРИЕВ Сергей Владимирович – д.ф.-м.н., Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН,

e-mail: dmitriev.sergey.v@gmail.com

стью при высоких температурах, а с 8–12 вес.% – при низких температурах. Сплавы с 24–26 вес.% Re демонстрируют оптимальное сочетание прочности и пластичности, но превышение предела растворимости приводит к сегрегации Re, что ухудшает однородность сплава.

Радиационное облучение приводит к тому, что в сплавах W-Re формируется большое количество дефектов: поры, дислокационные петли и разнообразные фазы. Поры и дислокационные петли имеют значимое влияние на механические характеристики сплавов, однако наибольший вклад в упрочнение и разупрочнение вносят именно частицы. На рис. 2 показаны структурные изображения облученных сплавов вольфрама.

Основное внимание исследований сосредоточено на повышении прочности и разработке механизмов упрочнения сплавов W-Re для использования в инструментах для сварки трением, ракетных соплах, термopарах и других устройствах. Тем не менее, обзоры по сплавам W-Re сфокусированы на пояснении эксплуатационных характеристик сплава в узкой специализированной сфере, не раскрывая общих закономерностей. Настоящая работа направлена на разбор основных упрочняющих фаз в сплавах W-Re, механизмов упрочнения, влияния фаз на механические свойства сплава и термическую стабильность в условиях экстремальных эксплуатационных температур. В заключение представлены перспективы дальнейших исследований по улучшению характеристик W-Re сплавов.

Типы упрочняющих фаз. Основные упрочняющие фазы в системе W-Re можно разде-

лить на две группы: легирующие фазы, которые специально добавляют в исходный сплав для повышения эксплуатационных характеристик, и фазы, которые формируются в процессе внешних воздействий (высокая температура, облучение, трансмутация). К первой группе относятся карбидные фазы (HfC, ZrC и SiC) и оксидные фазы (ThO₂, Y₂O₃). Ко второй группе относятся интерметаллидные фазы системы W-Re с различными конфигурациями, которые могут быть когерентными и некогерентными. Рассмотрим каждую группу подробнее.

Карбиды, такие как HfC, ZrC и SiC, широко используются для упрочнения вольфрамовых сплавов. Эти твердые и термостойкие фазы дисперсно распределяются в матрице, что препятствует движению дислокаций и увеличивает механическую прочность [9, 10]. Карбиды повышают устойчивость к ползучести, износу и сохраняют структуру при высоких температурах. Их взаимодействие с дислокациями и зернограничными областями способствует улучшению высокотемпературных механических свойств и долговечности сплавов.

Оксиды Y₂O₃, ThO₂ и др. эффективно упрочняют вольфрамовые сплавы. Они образуют мелкодисперсные частицы, которые препятствуют движению дислокаций и стабилизируют микроструктуру. Оксиды повышают прочность, пластичность и термическую стабильность, предотвращают рост зерен при высоких температурах и улучшают устойчивость к окислению [11]. Эти свойства делают сплавы более долговечными и пригодными для применения в экстремальных условиях, таких как термоядерные реакторы и высокотемпературные инструменты.

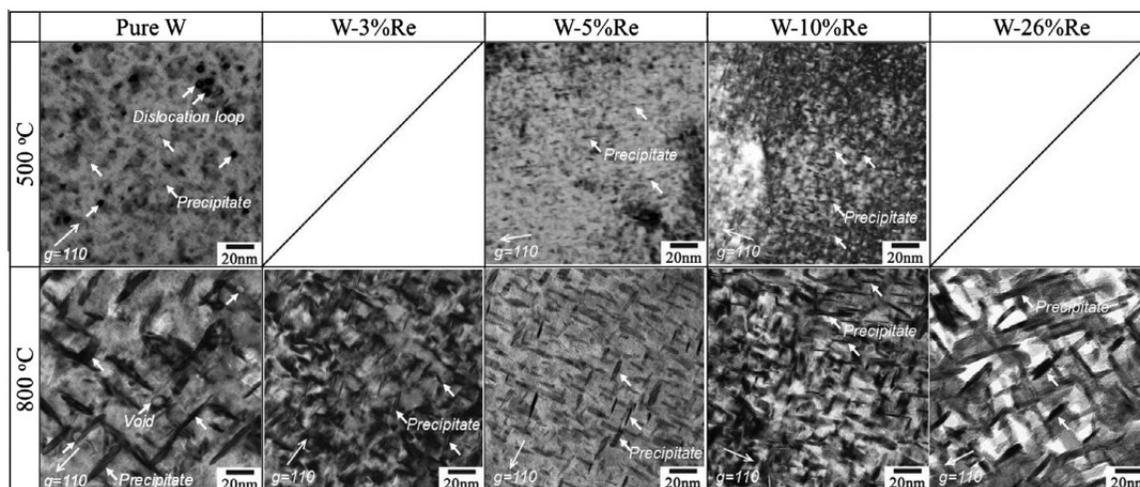


Рис. 2. ПЭМ-изображения чистого W и сплавов W-Re после нейтронного облучения до 0.90 дпа при 500°C и 0.98 дпа при 800°C. Взято из работы [8]

Интерметаллидные фазы системы W-Re не являются легирующими элементами и образуются в процессе эксплуатации материала. Различают несколько основных фаз (ОЦК, σ , χ , ГПУ), которые могут быть когерентными и некогерентными. Данные фазы формируются за счет облучения (например, трансмутация атомов W в Re). Каждая из подобных интерметаллидных частиц с разной степенью влияет на упрочнение вольфрама и по-разному взаимодействует с другими структурными элементами в сплаве [12, 13].

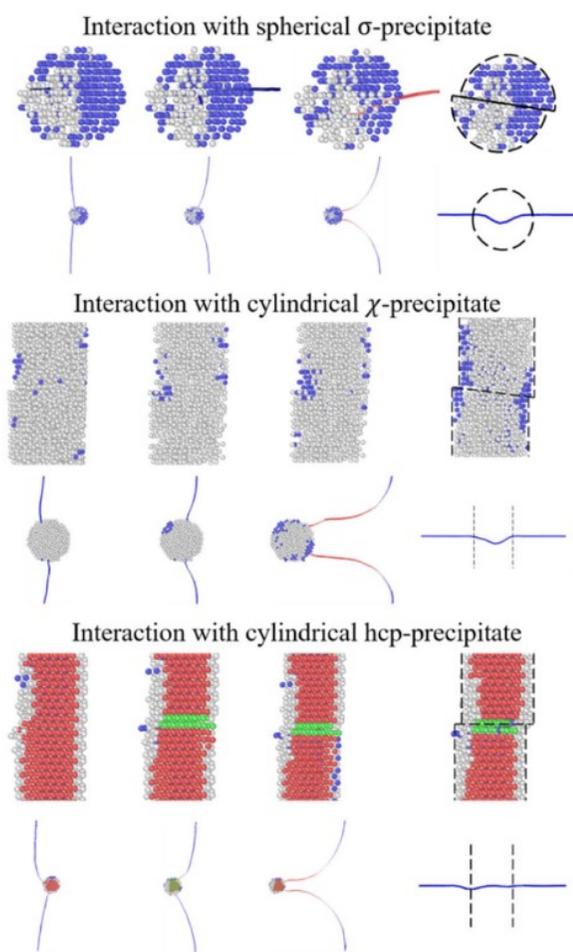


Рис. 3. Взаимодействие краевой дислокации с различными интерметаллидными фазами в вольфраме. Взято из работы [18]

Важно понимать, что проведение экспериментальных исследований для определения влияния упрочняющих фаз на эксплуатационные характеристики вольфрамовых сплавов является дорогостоящим. Кроме того, под воздействием некоторых внешних условий, таких как облучение, проблематично заглянуть «внутри» материала, чтобы подробно изучить механизмы его

эволюции. В таких случаях целесообразно использовать методы компьютерного моделирования [14, 15], которые позволяют провести симуляцию различных внешних условий. Применение метода молекулярной динамики позволяет решать задачи, имеющие прикладное значение, например, при анализе эффекта электропластичности [16] или проводимости структуры полимер-металл [17]. Авторы работы [18] использовали программное обеспечение LAMMPS [19] для изучения механизма взаимодействия интерметаллидных фаз системы W-Re со структурными дефектами в матрице вольфрама, как показано на рис. 3.

Компьютерное моделирование является хорошим инструментом для соотношения полученных результатов с экспериментальными данными, а также позволяет предсказать поведение материала в различных условиях.

Механизмы упрочнения. Упрочнение вольфрамовых сплавов обеспечивается несколькими механизмами [20]. Одним из ключевых механизмов является дислокационное взаимодействие, которое включает препятствование движению дислокаций за счет внутренних напряжений и препятствий, создаваемых упрочняющими фазами. Упрочняющие фазы, такие как σ - и χ -фазы, создают локальные поля напряжений, значительно увеличивающие сопротивление движению дислокаций. Экспериментальные данные показывают, что увеличение объемной доли этих фаз способствует значительному росту прочностных характеристик. Размер частиц упрочняющих фаз и их распределение играют ключевую роль: мелкодисперсные частицы обеспечивают более равномерное распределение напряжений, что приводит к повышению общего сопротивления деформации.

Механизм Орована объясняет упрочнение через изгиб дислокаций вокруг мелкодисперсных частиц, что повышает сопротивление пластической деформации. Критическое напряжение для изгиба дислокаций можно описать упрощенным выражением:

$$\tau_c = \frac{Gb}{L},$$

где G – модуль сдвига, b – вектор Бюргерса, L – расстояние между частицами. При малых размерах частиц и их равномерном распределении эффективность этого механизма возрастает. В действительности, общего выражения для

определения критического напряжения для изгиба дислокации не существует, так как на величину этого напряжения влияет множество факторов. В случае сплавов W-Re мелкодисперсные σ -частицы выступают основными препятствиями для дислокаций. Исследования показывают, что минимальный эффективный размер частиц составляет порядка 10–20 нм, что обеспечивает их стабильность даже при высоких температурах. Кроме того, модельные расчеты демонстрируют, что распределение частиц с учетом расстояний между ними позволяет оптимизировать механическую стабильность сплава.

Твердорастворное упрочнение достигается за счет легирования элементами, которые искажают кристаллическую решетку, создавая барьеры для движения дислокаций и повышая прочность сплава [9–11, 13]. Введение рения в решетку вольфрама приводит к образованию локальных полей напряжений из-за разницы в атомных радиусах. Это вызывает увеличение модуля упругости и уменьшение подвижности дислокаций. Теоретические расчеты и экспериментальные данные подтверждают, что оптимальная концентрация рения (≈ 5 –10 ат.%) обеспечивает наиболее эффективное упрочнение. Кроме того, твердорастворное упрочнение сохраняется даже при длительном воздействии высоких температур, что крайне важно для эксплуатации в условиях термоядерного синтеза.

Эффективность упрочнения сплавов W-Re значительно повышается за счет комбинированного действия описанных механизмов. Например, дислокационное взаимодействие усиливается благодаря наличию твердых растворов, создающих дополнительные барьеры для дислокаций. Одновременное действие механизма Орована и твердорастворного упрочнения позволяет достичь высокой прочности и пластичности. Экспериментальные данные показывают, что сбалансированное сочетание различных типов упрочняющих фаз и оптимальное их распределение позволяют избежать локальной пластичности и обеспечивают стабильную работу материала при экстремальных условиях. На рис. 4 показано, как именно происходит упрочнение сплава W-Re при реализации механизма Орована между краевой дислокацией и σ -частицей.

Влияние на механические свойства. Механические свойства вольфрамовых сплавов,

таких как твердость и прочность на сжатие, значительно улучшаются при добавлении упрочняющих фаз, таких как карбиды гафния (HfC) и циркония (ZrC). Эти фазовые компоненты обладают высокой твердостью и термической стабильностью, что делает их идеальными для улучшения свойств металлической матрицы. Исследования показали, что добавление 10% HfC в сплавы системы W-3Re приводит к увеличению твердости и прочности на сжатие на 92.5 и 286% соответственно [21]. Результаты данного исследования изображены на рис. 5.

Этот эффект достигается благодаря нескольким упрочняющим механизмам. Во-первых, карбиды эффективно измельчают зерна вольфрама, что снижает склонность материала к охрупчиванию при низких температурах. Во-вторых, Ороановское упрочнение, возникающее из-за взаимодействия дислокаций с частицами карбидов, существенно повышает сопротивление пластической деформации. Кроме того, термическое несоответствие между фазами усиливает внутренние напряжения на границах зерен, что дополнительно препятствует их движению. Важно отметить, что комбинация упрочнения за счет твердых растворов и дисперсных частиц обеспечивает синергетическое улучшение механических характеристик, особенно в условиях высоких нагрузок и экстремальных температурных градиентов. Добавление Re и SiC также способствует улучшению структуры матрицы, обеспечивая устойчивость материала к длительным воздействиям механических напряжений.

Помимо карбидов, некоторые оксиды также способствуют существенному приросту механических свойств при высоких температурах. Например, ThO₂, оксид с самой высокой температурой плавления (3473 К), был использован для улучшения высокотемпературных характеристик сплавов W-Re. Луо и др. исследовали высокотемпературные свойства при растяжении W-26Re-1ThO₂ [11]. Было обнаружено, что ThO₂ увеличивает температурную чувствительность и скорость деформационного упрочнения W-26Re при высоких температурах. Однако из-за большого размера частиц ThO₂ и агломерации границ зерен ThO₂ высокотемпературное упрочняющее действие оксида ограничено. Прочностные характеристики таких сплавов представлены на рис. 6.

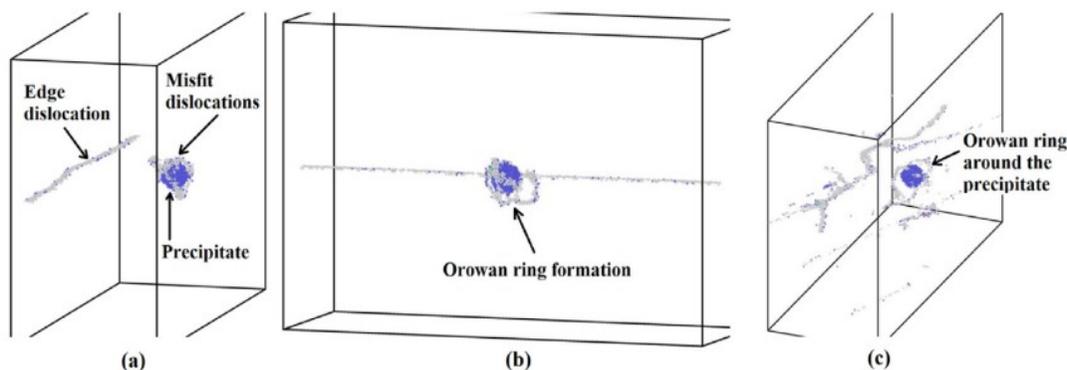


Рис. 4: *a* – исходное положение краевой дислокации и σ -сферической частицы, окруженной дислокациями несоответствия; *b* – образование кольца Орована во время деформации; *c* – кольцо Орована вокруг σ -фазы после взаимодействия. Взято из работы [13]

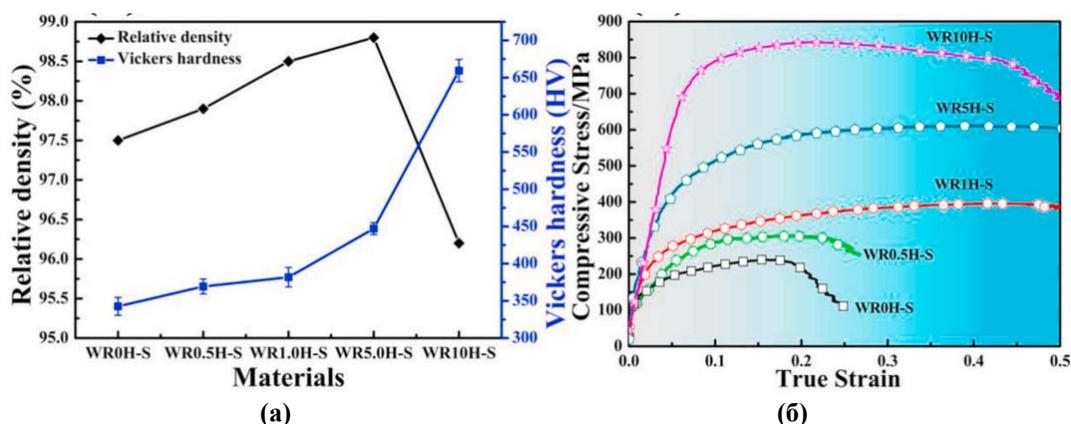


Рис. 5: *a* – относительная плотность и микротвердость по Виккерсу спеченных композитов W-3Re-xHfC; *b* – кривые зависимости напряжения и деформации при сжатии композитов W-3Re-xHfC, легированных различным содержанием HfC, при 1500°C соответственно. Взято из работы [21]

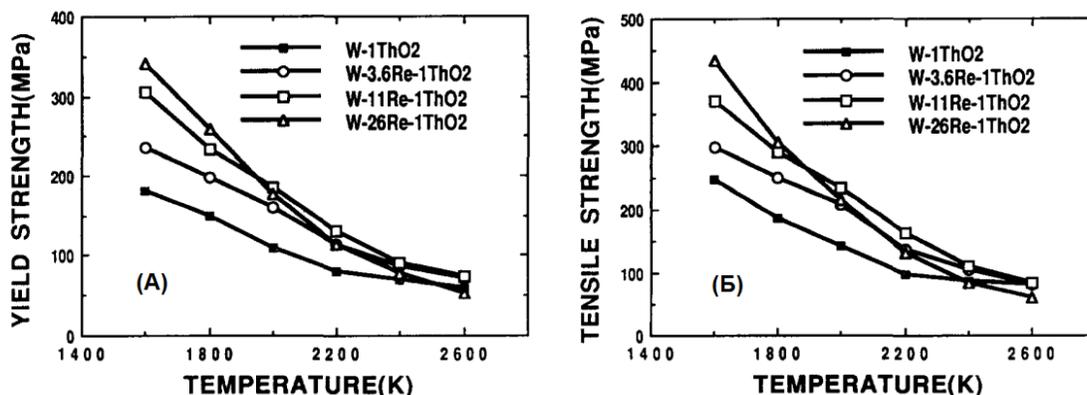


Рис. 6: *a* – пределы текучести и *b* – пределы прочности при растяжении сплавов W-1ThO₂ и W-Re-ThO₂ в зависимости от температуры. Взято из работы [11]

Температурная стабильность упрочняющих фаз. Термостабильность вольфрамовых сплавов является одним из ключевых факторов их успешного применения в условиях высоких температур, таких как тепловыделяющие элементы в реакторах или компоненты термо-

ядерного синтеза. Введение упрочняющих фаз, таких как ZrC и HfC, существенно повышает эту характеристику. Например, добавление ZrC способно поднять рекристаллизационную температуру сплава до 1600–1700°C, тогда как для чистого вольфрама эта температура составляет

около 1200°C [22]. Высокая термическая стабильность упрочняющих фаз обусловлена их химической стойкостью и низкой склонностью к диффузии при повышенных температурах. Кроме того, такие фазы, как ZrC, стабилизируют низкоугловые границы зерен и дислокации, что препятствует их коалесценции и росту. Это особенно важно для предотвращения охрупчивания, которое часто наблюдается у чистого вольфрама после термической обработки. Высокая термостабильность упрочняющих фаз также снижает температуру перехода материала от хрупкого к пластическому состоянию, что позволяет сохранить пластичность и прочность даже после длительного нагрева. На рис. 7 представлены кривые напряжение–деформация для различных образцов сплава системы W-Re с добавлением ZrC, нагретых при различных температурах. Благодаря термостабильности, сплавы W-Re с добавлением фаз ZrC и HfC находят применение в таких ответственных областях, как аэрокосмическая техника и ядерная энергетика, где требования к материалам включают не только механическую прочность, но и устойчивость к термическому разрушению и деформации.

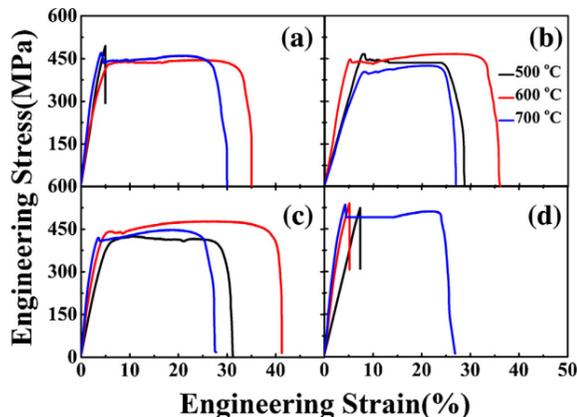


Рис. 7. Кривые зависимости напряжений–деформаций неотожженных и отожженных образцов, испытанных при температурах 500, 600 и 700°C: *a* – неотожженные; *b* – отожженные при температуре 1700°C; *c* – отожженные при температуре 1800°C; *d* – отожженные при температуре 1900°C. Взято из работы [9]

Ползучесть – это неизбежный процесс пластической деформации, возникающий при работе в условиях высоких температур [23]. Он определяется как зависящая от времени пластическая деформация материалов в условиях вы-

соких температур и низких напряжений. Поведение материалов при ползучести должно учитываться при проектировании материалов, иначе срок службы материалов не оправдает ожиданий [23]. Прочность при ползучести является важным параметром для оценки долгосрочных характеристик ползучести материалов. На рис. 8 показано влияние второй фазы на прочность при ползучести вольфрама и вольфрамовых сплавов.

Из рис. 8 видно, что чистый W имеет самую низкую прочность при ползучести при различных температурах, а добавление небольшого количества Re немного повышает прочность при ползучести сплавов W-Re. Более того, прочность при ползучести сплавов W-Re значительно повышается после добавления ZrC. Однако прочность при ползучести систем W, W-Re и W-Re-ZrC сходится к значению насыщения при повышении температуры, что указывает на то, что упрочняющий эффект ZrC на сплавы W-Re уменьшается с повышением температуры. Снижение эффекта упрочнения объясняется эволюцией дислокаций при повышенных температурах [24, 25].

Изменение микроструктуры сплавов W-Re при радиационном воздействии. Микроструктура сплавов W-Re существенно влияет на их механические свойства и устойчивость к экстремальным условиям, таким как высокие температуры и радиационные нагрузки. Понимание изменения микроструктуры под действием облучения играет важнейшую роль при выборе материалов для использования в ядерных и термоядерных реакторах, где сплавы W-Re подвергаются интенсивному воздействию нейтронного и гамма-излучения.

При облучении сплавов возникают различные радиационные дефекты, включая вакансии, межузельные атомы, дислокационные петли, кластеры точечных дефектов и газовые пузыри. Эти дефекты могут существенно изменить микроструктуру сплава и повлиять на его механические свойства. В частности, формирование дислокационных петель и кластеров вакансий может вызывать локальное увеличение твердости материала, что приводит к повышению его сопротивления пластической деформации. Однако накопление таких дефектов также снижает пластичность и приводит к хрупкости [26].

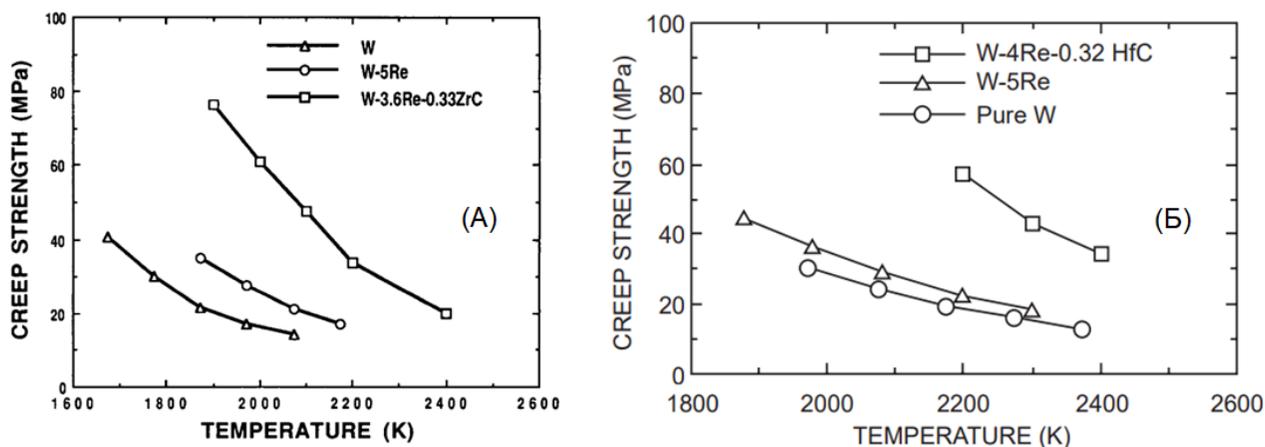


Рис. 8. Прочность при ползучести различных систем W-Re с добавлением карбидов при скорости ползучести 10^{-6} /с в диапазоне температур от 1600 до 2400 К. Взято из работ [А – 24, Б – 25]

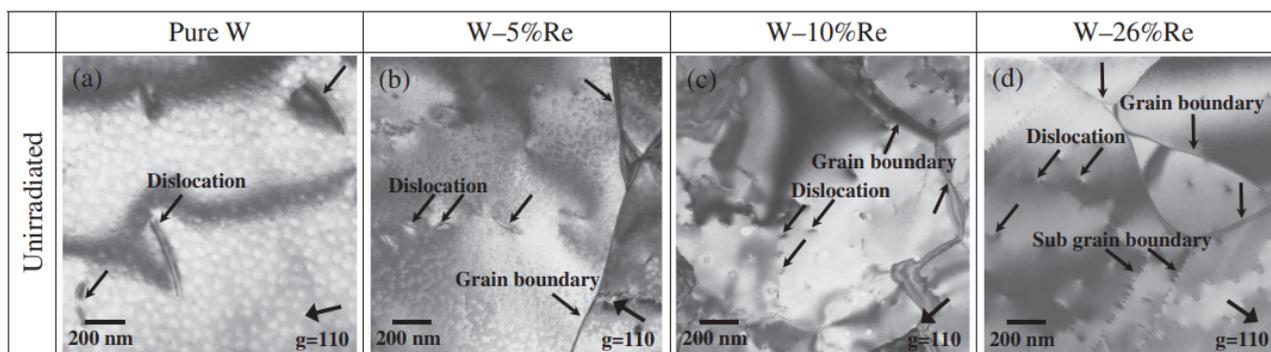


Рис. 9. Микроструктура сплавов W-Re до радиационного воздействия. Взято из работы [29]

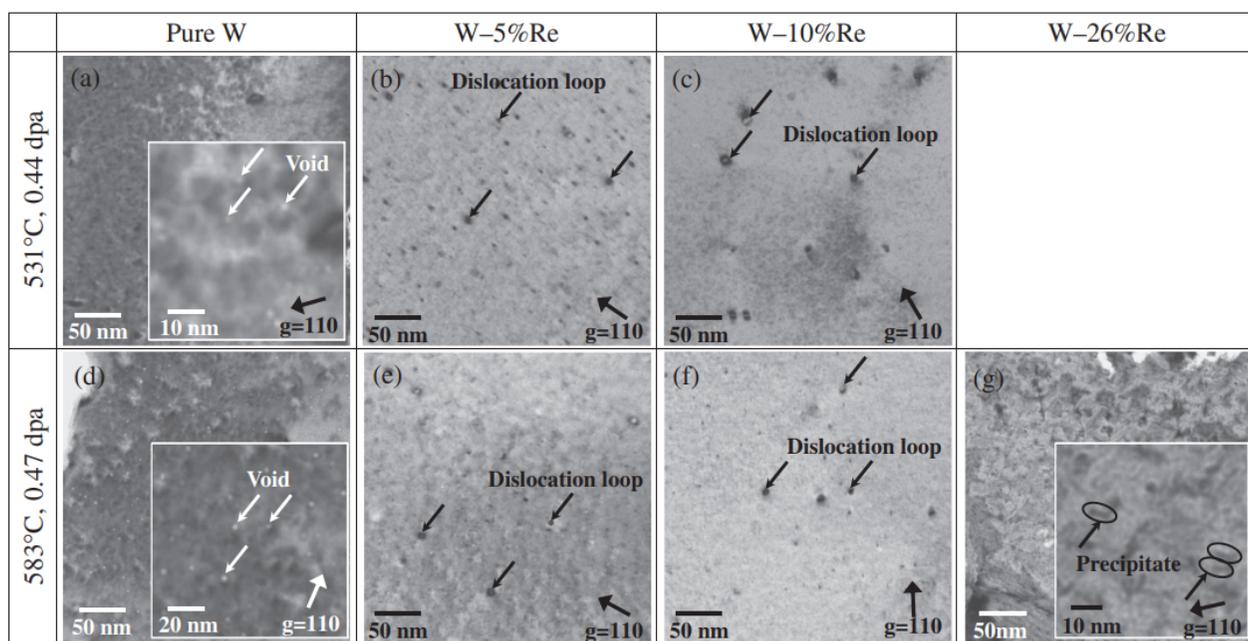


Рис. 10. Микроструктура сплавов W-Re при радиационном облучении при 531 и 583°C. Взято из работы [29]

Радиационное облучение способствует изменению структуры упрочняющих фаз, таких как σ -фаза и другие интерметаллиды, присутствующие в сплавах W-Re. Под действием высоких температур и радиационного воздействия возможна коагуляция частиц σ -фазы, что снижает эффективность механизма Орована. Также наблюдается радиационно-ускоренное растворение упрочняющих фаз, что приводит к ухудшению механических свойств, особенно при длительных сроках эксплуатации [27].

Одним из ключевых последствий радиационных изменений микроstructures является снижение ударной вязкости и пластичности материала. При низких температурах происходит радиационно-индуцированное хрупкое разрушение, связанное с образованием микротрещин вокруг кластеров дефектов. При высоких температурах увеличивается ползучесть материала из-за изменения характера взаимодействия дислокаций с радиационными дефектами и упрочняющими фазами. Экспериментальные исследования показывают, что после облучения сплавы W-Re демонстрируют повышенное сопротивление деформации, однако их пластичность значительно снижается, что ограничивает возможность их применения в условиях циклических термомеханических нагрузок [28, 29]. Изменение микроstructures сплавов W-Re при радиационном воздействии показано на рис. 9 и 10.

Как видно из рис. 9 и 10, радиационное воздействие даже при небольших температурах ведет к образованию большого количества дефектов. В частности, дислокационные петли, сформированные в результате рекомбинации точечных дефектов и дислокаций, за счет своего большого объемного количества и изменения микроstructures сплавов будут значительно влиять на механические свойства материалов.

Заключение. Вольфрамовые сплавы, упрочненные различными фазами, демонстрируют выдающиеся механические свойства и термостабильность, что делает их незаменимыми материалами для применения в условиях высоких температур и экстремальных нагрузок. Добавление рения эффективно решает проблему хрупкости вольфрама, повышая пластичность и улучшая прочность. Карбиды, оксиды и интерметаллиды, распределенные в матрице сплава, вносят значительный вклад в повышение прочностных характеристик за счет различных упрочняющих механизмов, таких как дислокаци-

онное взаимодействие, ороvanовское упрочнение и твердорастворное упрочнение.

Термостабильность упрочняющих фаз, таких как ZrC и HfC, позволяет значительно увеличить рекристаллизационную температуру и сохранить механические свойства сплавов даже при длительном нагреве. Это обеспечивает их устойчивость к термическим и механическим воздействиям в таких ответственных областях, как ядерная энергетика, аэрокосмическая техника и ракетостроение. Исследование изменения микроstructures сплавов W-Re при облучении позволяет глубже понять процессы деградации материала и разработать способы повышения его радиационной стойкости.

Перспективы дальнейших исследований включают оптимизацию состава сплавов W-Re, разработку новых упрочняющих фаз и изучение их синергетического взаимодействия для достижения еще более высоких эксплуатационных характеристик.

Литература

1. Ye J.H., Xu L.J., Hu J.K. // *Tungsten*. 2024. V. 6. P. 610–620.
2. Watanabe S., Nogami S., Reiser J., Rieth M., Sickinger S., Baumgärtner S., Miyazawa T., Hasegawa A. // *Fusion Eng. Des.* 2019. V. 148. P. 111323
3. Kishore N., Sudheer Kumar B., Manoj K.N.V.K., Balamurugan D., Sriram S. // *Mater. Sci. Eng. B Solid-State Mater. Adv. Technol.* 2022. V. 278. P. 115626.
4. Iqbal Z., Saheb N., Shuaib A.R. // *J. Alloys Compd.* 2016. V. 674. P. 189–199.
5. Nogami S., Noto H., Toyota M., Hattori T., Otomo K., Hasegawa A. // *Fusion Eng. Des.* 2018. V. 136. P. 76–81.
6. Liu Z.K., Chang Y.A. // *J. Alloys Compd.* 2000. V. 299. P. 153–162.
7. Kaufman L., Bernstein H., *Computer Calculation of Phase Diagrams* // Academic Press. New York, 1970.
8. Fukuda M., Yabuuchi K., Nogami S., Hasegawa A., Tanaka T. // *J. Nucl. Mater.* 2014. V. 455. P. 460–463.
9. Yang X.D., Xie Z.M., Miao S., et al. // *Fusion Eng. Des.* 2016. V. 106. P. 56–62.
10. Miao S., Xie Z., Lin Y., Fang Q., Tan J., Zhao Y. // *Metals*, 2020. V. 10. P. 277.
11. Luo A., Shin K. S., Jacobson D. L. // *Mater. Sci. Eng. A.*, 1991. V. 148. P. 219–229.
12. Sharapova Yu.R., Kazakov A.M., Babicheva R.I., Semenov A.S., Izosimov A.A., Korznikova E.A. // *Computation*, 2024. V. 12. P. 168.
13. Sharapova Yu.R., Kazakov A.M., Korznikova E.A., Zinovev A., Terentyev D., Dmitriev S.V. // *Karbala Int. J. Mod. Sci.* 2024. V. 11. P. 3.

14. Kolesnikov I.D., Shepelev I.A. // *Materials. Technologies. Design.* 2022. V. 4. P. 5–10.
15. Yankovskaya U.I., Zakharov P.V. // *Materials. Technologies. Design.* 2021. V. 3. P. 64–67.
16. Morkina A.Y., Tarov D.V., Naumova D.M., Tatarinov P.S., Tatarinov V.P., Semenov A.S., Yakushev I.A., Dmitriev S.V. // *Izvestija Ufimskogo nauchnogo centra RAN.* 2024. № 3. P. 15–23.
17. Yakovlev A.O., Tayupov M.M., Fanakova N.N. // *Izvestija Ufimskogo nauchnogo centra RAN.* 2024. № 3. P. 5–8.
18. Bonny G., Bakaev A., Terentyev D. // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. P. 16215.
19. Plimpton S. // *J. Comput. Phys.* 1995. V. 117. P. 1–19.
20. Azevedo C.R.F. // *Eng. Fail. Anal.* 2011. V. 18. P. 1921–1942.
21. Li Y., Zhang W., Li J., Lin X., Gao X., Wei F., Zhang G., Li L. // *Mater. Sci. Eng. A*, 2021. V. 814. P. 141198.
22. Zhang T., Du W.Y., Zhan C.Y., Wang M.M., Deng H.W., Xie Z.M., Li H. // *Nucl. Eng. Tech.* 2022. V. 54. P. 2801–2808.
23. Webb J., Gollapudi S., Charit I. // *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2019. V. 82. P. 69–80.
24. Luo A., Jacobson D.L. // *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 1992. V. 11. P. 97–103.
25. Park J.J., Lee J.D. // *J. Mater. Sci. Lett.* 1999. V. 18. P. 273–275.
26. Rae C.M.F., Reed R.C. // *Acta Mater.* 2001. V. 49. P. 4113–4125.
27. Tanno T., Fukuda M., Nogami S., Hasegawa A. // *Mater. Trans.* 2011. V. 52. P. 1447–1451.
28. Siller M., Schatte J., Gerzoskovitz S., Knabl W., Pippan R., Clemens H., Maier-Kiener V. // *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2020. V. 92. P. 105285.
29. Fukuda M., Tanno T., Nogami S., Hasegawa A. // *Mater. Trans.* 2012. V. 53. P. 2145–2150.



HARDENING PHASES IN W-RE ALLOYS: MECHANISMS, PROPERTIES AND TEMPERATURE STABILITY

© A.M. Kazakov¹, J.G. Rahmatullina¹, A.R. Halikov¹, J.R. Sharapova¹, S.V. Dmitriev²

¹Ufa University of Science and Technology,
32, ulitsa Zaki Validi, 450008, Ufa, Russian Federation

²Institute of Molecule and Crystal Physics – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre
of the Russian Academy of Sciences,
151, prospect Oktyabrya, 450075, Ufa, Russian Federation

W-Re alloys are unique refractory materials that exhibit excellent mechanical properties and high thermal stability. Strengthening of these alloys is achieved through the formation of various phases such as carbides, oxides and intermetallics, which increase strength, ductility and resistance to thermal stress. The aim of this review is to summarise current data on the types of strengthening phases, their mechanisms of formation and their influence on the mechanical properties and thermal stability of W-Re alloys. Key aspects of hardening, including dislocation mechanisms, solid-phase interactions and microstructure stabilisation at high temperatures are discussed. The prospects for the use of W-Re alloys in extreme conditions and directions for further research to improve their performance are considered.

Keywords: tungsten, rhenium, intermetallics, hardening, high temperature.