

Вопросы для самоконтроля

№4 Химические свойства

1. Чем обусловлена высокая хим. стойкость ТМ VA-VIII групп по отношению к большинству газовых и жидких сред в обычных условиях (при $t_{\text{комн}}$)?

Малой хим. активностью. Они не взаимодействуют с компонентами воздуха, имеют высокую кор. стойкость при длительном пребывании в воде.

2. Какие вам известны общие особенности ТМ по хим. свойствам и коррозионной стойкости?

1) Металлы одной группы имеют близкие химические свойства. Это относится как к металлам VA группы – **V, Nb, Ta**, так и к металлам VIA группы – **Cr, Mo, W**.

2) Тугоплавкие переходные металлы могут изменять валентность в химических реакциях.

3) При переходе в пределах группы от металлов I-го большого периода к III-му (сверху вниз) в рядах $V \rightarrow Nb \rightarrow Ta$ и $Cr \rightarrow Mo \rightarrow W$ наблюдается уменьшение химической активности и увеличение коррозионной стойкости.

3. Какими свойствами обладают металлы одной группы VA – V, Nb, Ta и VIA – Cr, Mo, W и как изменяются эти свойства при переходе от первого периода к третьему, чем обусловлены эти изменения?

Тугоплавкие переходные металлы могут изменять валентность в химических реакциях.

Однако **производные высших валентностей всегда соответствуют номеру группы:** для группы V – это 5 (Me_2O_5); для группы Cr – это (MeO_3), для группы Re – (Me_2O_7).

В пределах одной группы **при переходе от первого большого периода к третьему наблюдается усиление тенденции к образованию производных высших валентностей.** Например, Cr – элемент I большого периода в различных соединениях может менять валентность от 3-х до 6-ти (Cr_2O_3 , CrO_3).

В то время для Mo и W характерные соединения, где эти металлы 6-ти валентны: MoO_3 , WO_3 .

4. Какой элемент среди ТМ VA и VIA групп обладает наиболее высокой кор. стойкостью и почему? В какой области промышленности он широко применяется? Та. Он обладает совершенной устойчивостью в минеральных кислотах всех концентраций при $t_{\text{комн}}$ и при нагревании; для изготовления ответственных деталей химической аппаратуры.

5. Чем обусловлена высокая хим. активность металлов IVA-VIA групп в воздушной атмосфере при повышенных температурах?

При повышенных температурах химическая активность ТМ резко возрастает.

6. До каких рабочих температур можно эксплуатировать изделия металлов большой четверки на воздухе без защитных покрытий?

До 500 °C

7. Каков механизм окисления Mo на воздухе без защитных покрытий?

Молибденовый лист, например, при 1200 - 1400°C окисляется насквозь за несколько минут. Следует отметить, что промышленные жаропрочные сплавы на основе молибдена имеют практически такое же низкое сопротивление окислению, как и нелегированный молибден.

Например, при нагреве на воздухе при 1300°C потеря массы за время 10 мин для жаропрочного молибденового сплава BM2 составляет 7,5 кг/м²

8. Каков механизм окисления ТМ IVA-VIA групп при высоких температурах?

1) Образование оксидной пленки в результате непосредственного взаимодействия металла с окислительной средой на поверхности, которая изолирует металл от непосредственного контакта с кислородом;

2) Взаимодействие кислорода с пленкой, через которую он и проникает вглубь металла, вызывая внутреннее окисление. **Кинетика окисления на второй стадии во многом определяется физико-химическими свойствами оксидной пленки.**

9. Каков механизм взаимодействия при контакте конструкционного ТМ с жидкими или газообразными щелочными металлами, как влияет примесь кислорода в щелочных металлах на кор. стойкость конструкций из ТМ?

1) растворение металла в расплаве, в том числе селективное компонентов сплава;

2) перенос массы вещества сплава при высокой скорости теплоносителя;

3) межкристаллитная коррозия.

Присутствие примеси кислорода в щелочном металле (выше 0,01%) резко повышает скорость коррозии. Считается, что ионы кислорода химически взаимодействуют с компонентами ТМ, в частности, с примесями на границах зерен, вызывая МКК.

11. Каков механизм взаимодействия металлов IV, VA групп с водородом?

Металлы IVA и VA групп активно взаимодействуют с водородом с образованием твердых растворов и гидридов.

Нагрев металлов VA группы даже кратковременный в водороде приводит к их резкому охрупчиванию из-за выделения гидридов по границам зерен. Водород растворяется в Nb и Ta обратимо. Нагрев гидрированных металлов в вакууме при 800-900°C и выше приводит к полному удалению водорода.

Металлы VIA группы и Re с водородом в твердом состоянии почти не взаимодействуют. Растворимость водорода в этих металлах ничтожно мала, гидриды неустойчивы.

Инертность этих металлов к водороду имеет важное практическое значение, т.к. позволяет проводить различные технологические нагревы в относительно дешевой водородной атмосфере.

12. Какие способы защиты ТМ от взаимодействия с газами воздуха существуют?

1) создание с помощью легирования специальных окалиностойких сплавов;

2) нанесение на изделие из ТМ окалиностойких ЗП.

2.1) плакирование более жаростойкими металлами и сплавами (хромирование, цинкование)

2.2) нанесение термодиффузионным путем многослойных покрытий, в состав которых входят Cr, Si, а также оксиды и силициды Al_2O_3 , ThO_2 , ZrO_2 , $MoSi_2$ и др.

2.3) нанесение металлических покрытий электролитическим осаждением

2.4) металлизация напылением или погружением в расплавленный металл

13. Какова кор.стойкость ТМ в жидких щелочных и других легкоплавких металлах?

Высокая по отношению к другим конструкционным металлам, но только если теплоноситель хорошо очищен от кислорода.

№5 Механические свойства

1. Какие факторы определяют разную склонность ТМ VA и VIA групп к хладноломкости?

Величина $T_{хр}$ широко используется для оценки склонности металла к хрупкому разрушению: чем выше $T_{хр}$, тем больше склонность металла к хрупкому разрушению.

2. Как влияют ЛЭ на склонность к хрупкому разрушению Cr, Mo и W?

Большинство легирующих элементов, образующие твердые растворы замещения, вызывают дополнительные искажения кристаллической решетки, затрудняют движение дислокаций, что вызывает повышение $T_{хр}$ и соответствующее снижение пластичности по сравнению с нелегированными ТМ.

3. Какая структура металлов VIA группы обеспечивают их минимальную склонность к хрупкому разрушению?

Полигонизованная структура, которая образуется в процессе дорекристаллизационного отжига. Снижение $T_{хр}$ при возникновении такой структуры связывают с резким повышением эффективной площади поверхности границ (здесь роль границ выполняют стенки ячеек или субзерен). Это ведет к снижению удельного количества выделений избыточных фаз и сегрегаций примесей внедрения по границам – основной причины хрупко-вязкого разрушения металлов VIA гр. с ОЦК-решеткой.

4. Как влияют примеси внедрения на низкотемпературную хрупкость ТМ с ОЦК-решеткой?

увеличение концентрации примесей, растворяющихся в ОЦК металлах по способу внедрения (H, O, N, C и др.), вызывает повышение $T_{хр}$.

В состоянии высокой чистоты (при суммарном содержании примесей < 10⁻⁵-10⁻⁶%) ТМ пластичны вплоть до глубоких отрицательных температур.

Например:

Mo с повышенным содержанием примесей (0,02%O) имеет $T_{хр}=300^{\circ}C$

Mo технической чистоты (0,002%O) имеет $T_{хр}=+20^{\circ}C$

Mo, очищенный зонной плавкой, ($\leq 0,0001\%$) имеет $T_{хр}\leq -196^{\circ}C$

Однако в технических металлах их $T_{хр}$ резко повышается.

5. Какие существуют методы количественной оценки показателя хладноломкости – температуры хрупковязкого перехода – $T_{хр}$?

Определяют по температурной зависимости какого-либо показателя пластичности при механических испытаниях (δ , ψ , KCU, угол загиба при испытаниях на изгиб и др.) Берется средняя температура в

интервале $a-b$, где резко меняется пластичность ($\Delta T_{хр}$). Иногда $T_{хр}$ определяют по крайним точкам (a, b).

6. Какие факторы называют внешними и какие внутренними и как они влияют на температуру хрупко-вязкого перехода?

Внешние:

- условия испытаний: динамические или статические, схема напряженного состояния, скорость деформации.
- геометрия образцов
- состояние поверхности

Увеличение жесткости при механических испытаниях и увеличение скорости деформации приводит к повышению $T_{хр}$.

Наиболее неблагоприятной для пластической деформации является схема всестороннего растяжения, наиболее благоприятной – всестороннего неравномерного сжатия.

Внутренние:

- концентрация примесей внедрения
- микроструктура

Увеличение концентрации примесей, растворяющихся в ОЦК металлах по способу внедрения (H, O, N, C и др.), вызывает повышение $T_{хр}$.

7. Какова природа низкотемпературной хрупкости ТМ с ОЦК-решеткой?

Существенное разупрочнение нелегированных ТМ VA и VIA групп при относительно низких гомологических температурах обусловлено особенностями их ОЦК решеток. С повышением температуры облегчается поперечное скольжение винтовых дислокаций, уменьшаются силы трения решетки, обусловленные наличием примесей внедрения, растет число действующих систем скольжения.

Субструктура с гомогенным распределением дислокаций в ОЦК металлах формируется при низкотемпературной деформации с высокими скоростями. Она дает минимальную пластичность и максимальную $T_{хр}$.

8. Какие известны способы снижения хладноломкости ТМ с ОЦК-решеткой?

1. **Снижение концентрации примесей внедрения** различными технологическими способами: повышение степени вакуума и использование без-масляных вакуумных насосов в печах для плавки ТМ

2. **Создание оптимальной структуры** (в деформированном состоянии – полигонизованной, в рекристаллизованном – мелкозернистой без сплошных прослоек избыточных фаз на границах).

3. **Использования монокристаллов** (где это возможно) в качестве заготовок для изготовления деталей или последующей деформации.

4. Рациональное **легирование** с целью понижения $T_{хр}$.

9. Какие способы упрочнения чистых ТМ VA и VIA групп для работы при высоких температурах? Как изменяются характеристики прочности и удельной прочности у этих металлов при достижении рабочих температур?

Единственный способ упрочнения чистых металлов – это деформационное упрочнение.

ТМ VA и VIA Гр. при достижении рабочих температур разупрочняются более чем в 5-7 раз по сравнению с комнатной.

Cr по удельной прочности в диапазоне температур 400-800 °C превосходит другие ТМ, в диапазоне температур 800-1200 °C наибольшую удельную прочность имеет Mo и только выше 1300-1400 °C у самого тяжелого, но и самого тугоплавкого W по абсолютной и удельной прочности и жаропрочности нет конкурентов. Характерно, что тугоплавкий, но и очень тяжелый Ta уступает по удельной прочности другим тугоплавким металлам во всем диапазоне рабочих температур.

Существенное разупрочнение нелегированных ТМ VA и VIA групп при относительно низких гомологических температурах обусловлено особенностями их ОЦК решеток. С повышением температуры облегчается поперечное скольжение винтовых дислокаций, уменьшаются силы трения решетки, обусловленные наличием примесей внедрения, растет число действующих систем скольжения.

10. Дайте определение жаропрочности металлических материалов

Жаропрочность – это способность материалов работать под напряжением в условиях повышенных температур без заметной деформации и разрушения.

11. Какие методы мех.испытаний используются для определения жаропрочности металлических материалов?

испытание на длительную прочность и ползучесть. проводятся по схеме одноосного растяжения.

12. Что такое длительная прочность? Расшифруйте запись $\sigma_{\square}^{t_{исп}}$ (например, σ_{100}^{1000}) при испытаниях на длительную прочность.

Предел длительной прочности – это условные напряжения(σ), под действием которого материал разрушается при данной температуре(t) за заданный промежуток времени(τ).

Предел длительной прочности обозначается буквой(σ) с двумя индексами: верхний – температура($t, ^\circ\text{C}$) испытания, нижний – время(τ , часы) до разрушения.

13. Что такое ползучесть? Дайте определение ползучести при испытаниях металлических материалов. Расшифруйте запись $\sigma_{\varepsilon/\tau}^t$ (например, $\sigma_{1/1000}^{800}$).

Ползучесть – самопроизвольная пластическая деформация образца во времени при постоянной температуре и при постоянном приложенном напряжении. Проявляется при $T=0,4 T_{\text{плав}}$ (K), напряжение \geq предела ттекучести.

Ползучестью называют явление непрерывной деформации под действием постоянного напряжения при повышенной температуре.

Основной целью стандартных испытаний на ползучесть при растяжении **является определение явления ползучести.**

Существует два ограничения для критерия ползучести:

1. Ограничения по скорости($V(\%/ч)$) на установившейся стадии ползучести

В этом случае **предел ползучести – это условное напряжение, при котором скорость ползучести достигает определённой величины.** Предел ползучести обозначается буквой σ с двумя индексами: нижний соответствует заданной скорости ползучести($V(\%/ч)$), верхний –

температура испытания $\sigma_{V/t/\tau}^{t_{исп}}$ ($\sigma_{1 \cdot 10^{-4} \% / ч}^{1000}$)

2. Ограничение по деформации ползучести

В этом случае предел ползучести обозначается буквой σ с тремя индексами: верхний определяет температуру испытания($t_{исп}$), два нижних – деформацию (ε) и время (τ):

$$\sigma_{\frac{\varepsilon}{\tau}}^{t_{исп}} \left(\sigma_{\frac{1}{1000}}^{800} = 100 \text{ МПа} \right)$$

Расшифровка записи: предел ползучести 100 МПа при 800 $^\circ\text{C}$, когда деформация $\varepsilon = 1\%$ достигается за 1000 ч.

14. Что такое длительная жаропрочность и как определяется? В каких случаях ее определение является обязательным?

№6 Принципы легирования

1. Какой существует способ упрочнения нелегированных ТМ с целью создания жаропрочных материалов?

Деформационное упрочнение

2. Как сильно разупрочняются металлы VA и VIA групп при достижении рабочих температур?

ТМ с ОЦК решёткой при достижении рабочих температур разупрочняются более чем в 5-7 раз по сравнению с $T_{комн.}$. Разупрочнение нелегированных ТМ VA и VIA групп обусловлено особенностями их ОЦК решеток. С повышением температуры облегчается поперечное скольжение винтовых дислокаций, уменьшаются силы трения решетки, обусловленные наличием примесей внедрения.

3. Назовите примерный диапазон рабочих температур для металлов VA и VIA групп. Как он изменяется при расчете жаропрочности на характеристиках удельной прочности?

По характеристикам удельной прочности из-за разной плотности металлы VA и VI A групп в определенном диапазоне температур меняются местами по сравнению с пределом прочности и 100-часой прочностью.

- *Cr* по удельной прочности в диапазоне температур 400-800°C превосходит другие ТМ
- При 800-1200°C наибольшую удельную прочность имеет *Mo*
- Выше 1300-1400°C у *W* по абсолютной и удельной прочности и жаропрочности **нет конкурентов**
- *Ta* уступает по удельной прочности другим ТМ во всем диапазоне рабочих температур.

4. Как создаются жаропрочные сплавы на основе ТМ VA и VIA групп с использованием метода твердорастворного упрочнения? Каковы достоинства и недостатки этих материалов? Какова роль диаграмм состояния при создании таких сплавов?

Для твердорастворного упрочнения ТМ обычно используют другие ТМ по следующим причинам:

1. Из-за близости электронного и кристаллического строения ТМ растворяются друг в друге в больших количествах.

2. Негугоплавкие металлы других групп весьма ограниченно растворимы в ТМ. Это ограничивает возможность создания сплавов-твердых растворов. Не ТМ резко снижают солидус даже при введении их в сплавы на основе ТМ в небольших количествах. Это недопустимо. В сплавах-растворах с низким солидусом сильно развиваются диффузионные процессы при нагреве и сплав становится менее прочным, чем нелегированный ТМ-основа. *Твердые растворы, образуемые при сплавлении ТМ друг с другом всегда имеют достаточно высокий солидус. Это является главной причиной твердорастворного упрочнения с использованием в качестве легирующих элементов только тугоплавкие металлы.*

ТМ образуют между собой твердые растворы замещения. Упрочнение достигается за счет:

- дополнительного закрепления дислокаций растворенными атомами и в результате торможения дислокаций полями упругих напряжений вокруг растворенных атомов;
- уменьшение при легировании диффузионной подвижности атомов.

Возможности легирования ТМ с целью создания жаропрочных сплавов весьма ограничены, т.к. при этом снижается пластичность и повышается t_{хр}.

5. Каковы принципы легирования при создании жаропрочных сплавов на основе металлов VA и VIA групп с упрочнением за счет образования избыточных фаз. Какие требования предъявляются к избыточным фазам при этом?

При температурах выше 0,5-0,6 $T_{пл}$ твердорастворное упрочнение уже неэффективно. В этом случае увеличение жаропрочности можно получить за счет легирования такими элементами, которые будут обеспечивать получение избыточных фаз.

К фазам-упрочнителям на основе ТМ предъявляются особые требования:

- 1) они должны быть достаточно **жаропрочными, температура плавления их должна быть выше или, по крайней мере, соизмерима с $T_{пл}$ металла-основы сплава;**
- 2) они **должны иметь** высокую твердость, высокий модуль упругости, малый ТКЛР, т.е. иметь **высокие физические и механические свойства, которые определяют высокую прочность связи;**
- 3) **высокую термическую стабильность в сплаве, особенно в условиях длительной работы при высоких температурах;** поэтому фазы-упрочнители не должны иметь в своем составе атомов металла-растворителя;
- 4) при введении легирующих элементов, образующих **эти фазы, не должен резко понижаться солидус сплава;** поэтому данные фазы-упрочнители должны быть конгруэнтно плавящимися;
- 5) **они должны иметь невысокую плотность.**

Возможны два пути:

1. Интерметаллидное упрочнение

Для тугоплавких металлов **этот путь по ряду причин не дал положительных результатов** и пока практически не используется. Эти причины сводятся к следующему:

- 1) Даже самые известные интерметаллидные фазы на основе ТМ $\sigma(W_2Re_3, MoRe_3, Mo_2Os, Mo_3Ir, Ta_3Ir)$, $\lambda(W_2Zr, W_2Hf)$, $\epsilon(WRe_3, WIr_3)$ недостаточно тугоплавки;
- 2) В большинстве своем они инконгруэнтно плавящиеся, т.е. образуются по перитектическим реакциям. Поэтому введение легирующих элементов, образующих эти фазы, резко понижает солидус сплава, а следовательно, и уровень жаропрочности.
- 3) Введение в состав сплава необходимого для упрочнения количества интерметаллидной фазы приводит к резкому ухудшению технологичности и снижению низкотемпературной пластичности.

Второй путь связан с упрочнением такими элементами, которые образуют фазы внедрения.

6. Раскройте тему: Использование диаграмм состояния при выборе составов жаропрочных сплавов на основе металлов VA и VIA групп.

-оба компонента – ТМ, определить температуру равновесного солидуса изучаемого сплава, предельную растворимость второго компонента (если она имеется), изучить физико-химические свойства ближайшей к основе сплава промежуточной фазы (справочные данные) и т.д.

-несколько типовых тройных диаграмм состояния Me–Me'–X в виде изотермических сечений (схем) при температурах, близких к рабочим температурам жаропрочного сплава.

-два принципа

- 1) инструментальное упрочнение при создании гетерофазных сплавов неприемлемо;
- 2) присутствие в этих сплавах фазы-упрочнителя, содержащей основной компонент (чаще всего это карбидная фаза внедрения $Mo_2C, W_2C, Nb_2C, Ta_2C$ (в зависимости от основы сплава)) нежелательно и ее содержание должно быть исключено или сведено к минимуму.

7. Приведите основные типы тройных диаграмм состояния, которые используются при создании жаропрочных сплавов на основе металлов VA и VIA групп. Какие требования предъявляются к упрочняющим фазам при этом?

1. Первый тип тройной системы (рис. а) образуют металлы-аналоги, соседи в периодической системе. В каждой граничной двойной системе Me–X и Me'–X существуют по крайней мере две изоструктурные фазы внедрения типа Me_2X и MeX . Между металлами и изоструктурными фазами образуются непрерывные ряды твердых растворов $\alpha, \delta [(Me, Me')_2X]$ и $\gamma [(Me, Me')X]$. Очевидно, что такая система не перспективна для разработки сплавов с гетерофазным упрочнением, т.к. в равновесии с α_{Me} раствором в любом варианте будет находиться фаза, состав которой входит основной металл: $\alpha_{Me} + \delta [(Me_2Me')X]$.

2. Ко второму типу (рис. б) относятся системы, в которых между металлами и изоструктурными фазами типа MeX образуются непрерывные ряды твердых растворов α_{Me} и $\gamma [(Me, Me')X]$. В этой системе имеется вариант, когда при достаточно высоком содержании легирующего металла Me' в равновесии с α_{Me} твердым раствором будет находиться фаза $\gamma(Me'X)$, которую можно рассматривать как перспективную фазу-упрочнитель.

3. Третий тип диаграммы состояния (рис. в) реализуется в системах, в которых металлы Me и Me' находятся в различных группах и имеют ограниченную растворимость друг в друге. Предварительно необходимо провести триангуляцию этой системы. Если отсутствует квазибинарный разрез 1 (показан пунктирными линиями), эту систему считают наиболее перспективной для разработки жаропрочных сплавов на основе ТМ. Для этого в данной системе должен существовать квазибинарный разрез Me–Me'X с тугоплавкой эвтектикой, а избыточная фаза-упрочнитель Me'X отвечает требованиям этого назначения (см. слайд 64). Наиболее жаропрочные сплавы находятся в фазовой области $\alpha_{Me} + Me'X$ - вблизи квазибинарного разреза.

4. Четвертый тип диаграмм (рис. г) образуют металлы, которые находятся в разных группах периодической системы и имеют ограниченную растворимость друг в друге. В системе возможно существование тройных соединений (типа S) и, следовательно, может быть целая серия квазибинарных разрезов.

Поэтому при анализе этой системы сначала необходимо провести ее триангуляцию с целью определения квазибинарных разрезов. Если в системе существует квазибинарный разрез Me–Me'X, то такая система в принципе может быть выбрана для разработки жаропрочных сплавов. Если в системе существует разрез 1 (показан пунктирными линиями), то эта система будет неперспективной в любом варианте легирования, т.к. в равновесии с α_{Me} раствором будут находиться фазы Me_2X и $Me_mMe'_n$.

Рассмотренные типы диаграмм состояния не исчерпывают всего многообразия реальных тройных систем на основе тугоплавких металлов. Они являются упрощенной схемой, которая

помогает при выборе новых композиций сплавов и анализе их структуры. Следует отметить, что составы многих промышленных жаропрочных сплавов на основе молибдена и вольфрама находятся в тройных и более сложных системах (Mo-Zr(Ti,Hf)-C, Mo-Ta-Zr-C, W-Hf(Zr)-C), в которых имеются квазибинарные разрезы эвтектического типа (Me-Me'C), а упрочняющими фазами являются жаропрочные и исключительно тугоплавкие карбиды металлов IVA группы: TiC, ZrC и HfC.

№7 Жаропрочные сплавы на основе ТМ

Общие вопросы

1. Какие существуют способы повышения уровня жаропрочности при разработке сплавов на основе металлов VA и VIA групп за счет легирования?

1) твердорастворное упрочнение;

2) упрочнение за счет образования избыточных фаз при получении гетерофазных сплавов (дисперсионное и дисперсное упрочнение).

4. В чем различие дисперсионноупрочненных сплавов и дисперсноупрочненных сплавов на основе ТМ?

1. Основным признаком дисперсионноупрочненных сплавов является способность к старению (дисперсионному твердению), что предполагает наличие заметной растворимости упрочняющей фазы в матричном твердом растворе при высоких температурах и снижение растворимости при понижении температуры. Дисперсионноупрочненные сплавы на основе ТМ получают методом вакуумной плавки с последующей деформацией слитка или без нее. В основном эти сплавы подвергают различным видам отжига.

2. Дисперсноупрочненные сплавы на основе ТМ обычно получают методом порошковой металлургии (ПМ).

При получении спеченных сплавов к порошку основного металла добавляют определенную объемную долю порошка фазы-упрочнителя заданной дисперсности. После перемешивания такая смесь подвергается обычным операциям ПМ: брикетирование, спекание, экструзия.

5. В чем состоит способ создания жаропрочных сплавов на основе металлов «большой четверки», упрочненных фазами внедрения? Какие используются фазы внедрения при создании жаропрочных сплавов, какие этим фазам предъявляются требования? Какими способами они вводятся в ТМ?

При выборе типовых диаграмм учитывают два основополагающих принципа при создании жаропрочных сплавов на основе ТМ:

1) инструментальное упрочнение при создании гетерофазных сплавов неприемлемо;

2) присутствие в этих сплавах фазы-упрочнителя, содержащей основной компонент (чаще всего это карбидная фаза внедрения Mo₂C, W₂C, Nb₂C, Ta₂C (в зависимости от основы сплава)) нежелательно и ее содержание должно быть исключено или сведено к минимуму.

6. Назовите примерные интервалы температур, в которых наиболее перспективной основой для создания жаропрочных сплавов является Nb? В каких Ta, в каких Mo и в каких W? По каким свойствам проводится оценка этих диапазонов и почему?

7. Какие используются способы при создании жаропрочных сплавов на основе ТМ VA и VIA групп и сплавов на их основе? Проведите градуировку этих способов по предельным рабочим температурам.

Сопоставление различных механизмов упрочнения при создании жаропрочных сплавов на основе тугоплавких металлов

Это сопоставление рассматривается на примере Mo и его сплавов, при создании которых использовались различные механизмы упрочнения (рис. 23).

Как следует из рис. 23, даже технически чистый молибден (кривая 1) является превосходным жаропрочным металлом. Уже при температурах выше $0,5T_{пл}$ (1178 °C) по уровню прочности и жаропрочности он превосходит лучшие жаропрочные супер сплавы на никелевой и кобальтовой основах. Существенное упрочнение тугоплавких металлов может быть достигнуто в результате наклепа при пластической деформации. При низких температурах оно может быть выше, чем у сплавов с гетерофазным упрочнением (кривая 2). Однако при нагреве деформированный металл быстро разупрочняется. Поэтому деформационный механизм упрочнения не может использоваться для создания жаропрочных материалов на основе тугоплавких металлов. Как показывают данные механических испытаний, эффективным способом создания жаропрочных сплавов на основе ТМ является твердорастворное упрочнение (кривая 3).

Высоколегированные сплавы – твердые растворы по уровню прочности и жаропрочности при рабочих температурах $<0,5T_{пл}$ могут превосходить сплавы с гетерофазным упрочнением (кривые 4 и 5).

И только при высоких гомологических температурах (больше или равно $0,5T_{пл}$) сплавы с гетерофазным упрочнением превосходят по жаропрочности материалы с другими механизмами упрочнения (рис 23). Причем при температурах выше $0,6T_{пл}$ основы наиболее высокую прочность имеют сплавы с дисперсным механизмом упрочнения (кривые 4 и 5). Это объясняется особой термической стабильностью упрочняющих фаз в дисперсноупрочненных сплавах, получаемых методом ПМ.

8. Сформулируйте принципы легирования жаропрочных сплавов на основе ТМ «большой четверки». Уровень жаропрочности ТМ может быть существенно повышен за счет легирования. Как и при создании жаропрочных сплавов на любой основе, ТМ легируют элементами, упрочняющими матрицу за счет образования твердых растворов и частиц избыточных фаз. Иными словами, реализуются два известных способа упрочнения:

- 1) твердорастворное упрочнение;
- 2) упрочнение за счет образования избыточных фаз при получении гетерофазных сплавов (дисперсионное и дисперсное упрочнение).

Вопросы для сплавов на основе Mo, Nb, W и Ta

1. Назовите значения физических свойств Mo (Nb, W, Ta), определяющие возможность использования его в качестве основы жаропрочных сплавов.
2. Какой диапазон рабочих температур жаропрочных молибденовых (ниобиевых, вольфрамовых, танталовых) сплавов?
3. Какие принципы упрочнения используются при создании жаропрочных молибденовых (ниобиевых, вольфрамовых, танталовых) сплавов?
4. Какие требования предъявляются к фазам упрочнителям в гетерогенных жаропрочных молибденовых (ниобиевых, вольфрамовых, танталовых) сплавах?
- для гетерогенных – потому что в нететерогенных сплавах этих фаз нет, они гомогенны и там только альфа раствор
5. Какова роль углерода и металлов IVA группы в молибденовых (ниобиевых, вольфрамовых, танталовых) сплавах?
6. Какие диаграммы состояния являются перспективными для создания жаропрочных сплавов на основе Mo (Nb, W, Ta)?
- не для всех, так как сейчас не для всех сплавов найдены квазибинарные разрезы
7. Какова предельная растворимость углерода в молибдене (Nb, W, Ta) и как она изменяется с понижением температуры?
- всегда понижается
8. При каком соотношении углерода и циркония (по массе и в атомных процентах) сплавы системы Mo-Zr-C будут двухфазны?
9. При каком соотношении углерода и циркония в малолегированных молибденовых сплавах системы Mo-Zr-C возможно появление карбидной фазы Mo₂C?
10. Каков механизм быстрого окисления молибдена (Nb, W, Ta) на воздухе при температурах выше 1000 °С?
11. Каковы важнейшие для практики особенности свойств молибдена (Nb, W, Ta) и его сплавов?
12. Какие Вы знаете молибденовые (ниобиевые, вольфрамовые, танталовые) сплавы?
13. Почему плотность имеет важное значение для конструкционных материалов?
16. Какие ТМ и почему представляют интерес для использования в ядерных реакторах?
17. Какие факторы определяют разную склонность ТМ VA и VIA групп к хладноломкости?
18. Какая структура металлов VIA групп обеспечивает их минимальную склонность к хрупкому разрушению?
-полигонизованная
19. Сопоставьте по удельной жаропрочности Mo, W и Nb при температурах 3300 °С и 1900 °С.
20. Чем обусловлено относительно быстрое разупрочнение ТМ с ОЦК решеткой при повышенных температурах?
– ОЦК рыхлая
21. В чем состоят особенности легирования металлов «большой четверки» для повышения их жаропрочности?
22. Какие фазы упрочнители чаще всего используются в сплавах на основе ТМ VA И VIA групп?

23. Почему жаропрочность дисперсноупрочненных сплавов тугоплавких металлов выше, чем после закалки и старения на максимальную прочность?