

Практическая работа №5

**Механические свойства тугоплавких металлов**

## Содержание

1. Низкотемпературная хрупкость тугоплавких металлов.....	
1.1 Методы оценки хладноломкости.....	
1.2 Факторы, влияющие на хладноломкость ТМ и природа низкотемпературной хрупкости металлов с ОЦК-решеткой.....	
1.3 Способы снижения хладноломкости тугоплавких металлов.....	
2. Механические свойства для определения жаропрочности ТМ.....	

## 1. Низкотемпературная хрупкость тугоплавких металлов

В области механических свойств ТМ главная проблема связана с *низкотемпературной хрупкостью*. Проблема хрупкости является вторым после низкой жаростойкости *серьезным недостатком ТМ*.

У ТМ технической чистоты температура перехода из хрупкого состояния в пластичное может лежать выше комнатной. Это в первую очередь относится к металлам VIA группы. В результате такие *металлы оказываются хрупкими при  $t_{комн}$* , т.е. в обычных условиях. *Эти металлы называются хладноломкими*.

### 1.1 Методы оценки хладноломкости

Количественным показателем хладноломкости является температура хрупко-вязкого перехода -  $T_{хр}$ , которую определяют по температурной зависимости какого-либо показателя пластичности при механических испытаниях ( $\delta$ ,  $\psi$ , КСУ, угол загиба при испытаниях на изгиб и др.) (рис. 1).

*Берется средняя температура в интервале a-b, где резко меняется пластичность ( $\Delta T_{хр}$ )*. Иногда  $T_{хр}$  определяют по крайним точкам (a, b). Существуют и другие методы определения  $T_{хр}$ .

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

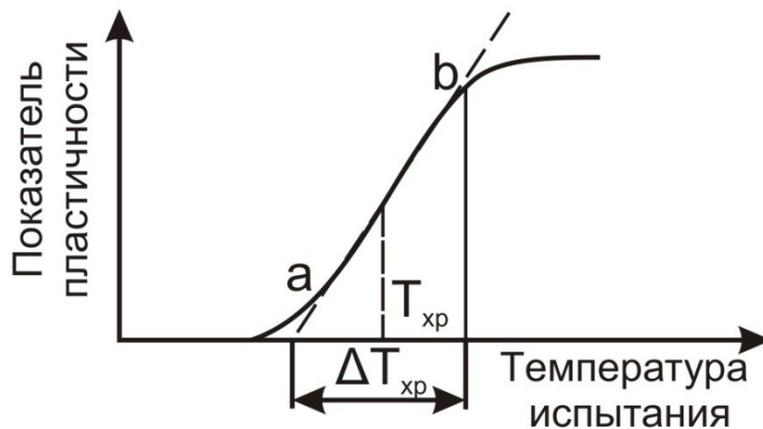


Рис. 1 – Зависимость показателя пластичности от температуры

## 1.2 Факторы, влияющие на хладноломкость ТМ и природа низкотемпературной хрупкости металлов с ОЦК-решеткой

*$T_{xp}$  не является физической константой материала. На характер разрушения и на  $T_{xp}$  оказывают влияние внешние и внутренние факторы.*

*Внешние факторы.  $T_{xp}$  зависит от условий испытаний (динамические или статические), от схемы напряженного состояния, скорости деформации. Определенное влияние на  $T_{xp}$  оказывает геометрия образцов и состояние поверхности. Увеличение жесткости при механических испытаниях и увеличение скорости деформации приводит к повышению  $T_{xp}$ .*

Это видно по результатам определения  $T_{xp}$  молибденового сплава ЦМ2А в деформированном состоянии по испытаниям на изгиб ( $\alpha$ ), растяжение ( $\delta$ ) и ударную вязкость (КСУ) (рис. 2, а), за величину  $T_{xp}$  принята верхняя граница интервала  $\Delta T_{xp}$ :  $T_{xp}$  изменяется от  $-50^{\circ}\text{C}$  при испытаниях на статический изгиб до  $+200^{\circ}\text{C}$  (при испытаниях на ударную вязкость – наиболее жесткая схема испытания).

*На величину  $T_{xp}$  влияет тип нагружения и зависящая от него схема напряженного состояния. Наиболее неблагоприятной для пластической деформации является схема всестороннего растяжения, наиболее благоприятной – всестороннего неравномерного сжатия.*

Это объясняется следующими причинами. Всестороннее сжатие препятствует межзернной деформации, уплотняет металл, ослабляет отрицательное воздействие неметаллических включений, уменьшает охрупчивающее действие растягивающих напряжений, возникающих при неравномерной пластической деформации. Поэтому даже хрупкий в обычных условиях вольфрам с  $T_{xp}=500^{\circ}\text{C}$  при гидроэкструзии со схемой неравномерного трехосного сжатия ведет себя как пластичный материал.

Поэтому сравнивать различные материалы по склонности к хладноломкости можно только в том случае, если  $T_{xp}$  была определена в одинаковых условиях.

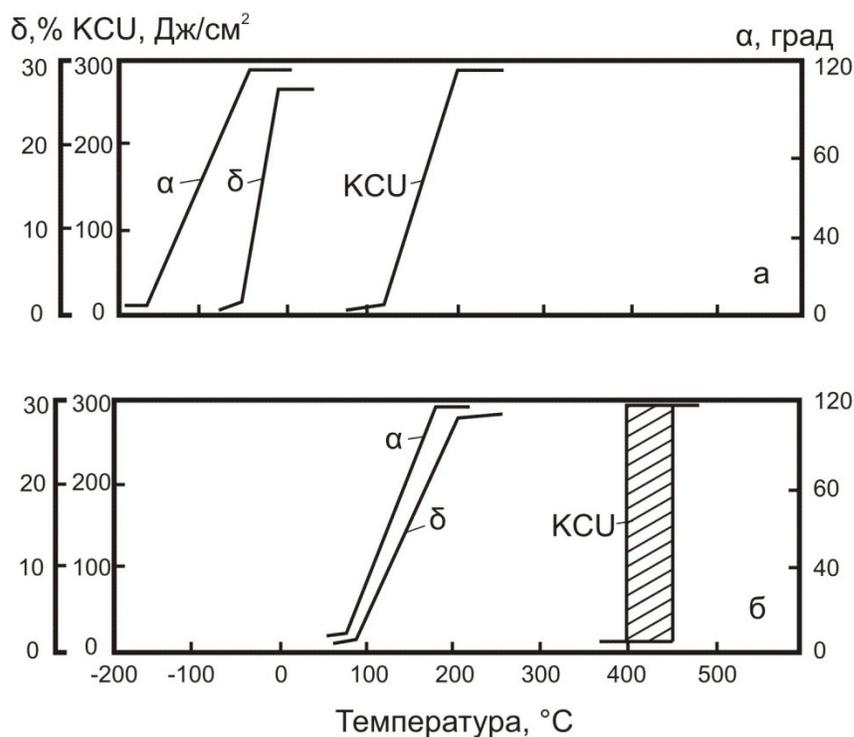


Рис. 2 – Изменение характеристик пластичности деформированных (а) и рекристаллизованных (б) образцов сплава ЦМ2А от температуры испытания

**Внутренние факторы.** Основными внутренними факторами, определяющими температуру  $T_{хр}$  ОЦК металлов, являются концентрация примесей внедрения и микроструктура.

*Увеличение концентрации примесей, растворяющихся в ОЦК металлах по способу внедрения (Н, О, N, С 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.

При одном и том же содержании примесей склонность к хрупкому разрушению у металлов VA и VIA групп различна. У W и Cr технической чистоты  $T_{хр} > t_{комн.}$ . Они являются хрупкими в обычных условиях, у Mo  $T_{хр}$  находится вблизи комнатной температуры. У Nb и V она отрицательна, а технически чистый Ta вообще не проявляет склонности к хрупкому разрушению. Его не следует относить к хладноломким металлам (рис. 3).

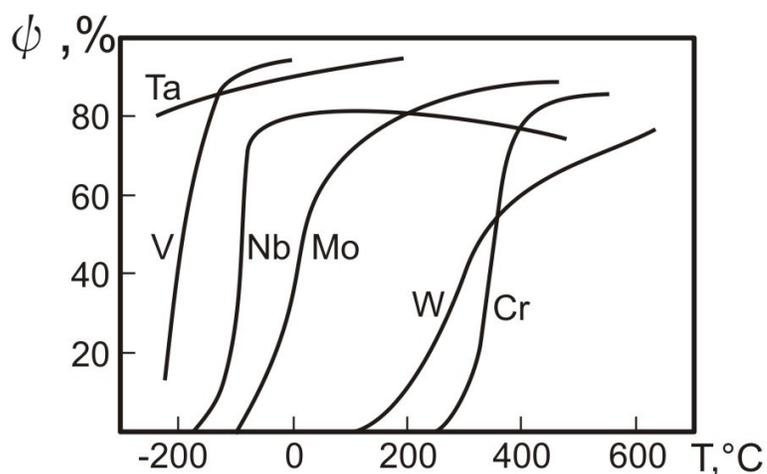


Рис. 3 – Изменение относительного удлинения ТМ в интервале температур хрупко-вязкого перехода

Такое различие в хладноломкости металлов VA и VIA групп связано с резко различной растворимостью в них примесей внедрения.

Как следует из табл. 1, в ниобии и тантале растворяется на 2-4 порядка больше примесей внедрения, чем в молибдене и вольфраме.

Металл	Растворимость $10^{-4}$ , %		
	C	N	O
Mo	0,1-1	1	1
W	<0,1	<0.1	<1
Nb	100	200	1000
Ta	10	1000	200

Табл. 1 – Растворимость C, N, O в ТМ VA и VIA групп при комнатной температуре

В то же время металлы VA группы даже без специальной очистки в большинстве случаев однофазны, и твердый раствор внедрения в них не насыщен.

На  $T_{хр}$  оказывают влияние и примеси замещения, но их влияние второстепенно.

**Влияние структуры.** Эффект влияния примесей внедрения на склонность к хрупкому разрушению различен в зависимости от того, какую структуру имеет металл и как распределены эти примеси. Например, V, Nb, Ta в отожженном после

литья и рекристаллизованном состояниях гораздо пластичнее, чем в деформированном.

*Пластичность же металлов VIA группы зависит от структуры в некоторых отношениях аномально.* Необычное изменение свойств в деформированном и отожженном состояниях проявляется в том, что *металлы VIA группы (Cr, Mo, W) имеют максимальную  $T_{xp}$ , когда в их структуре имеется сетка высокоугловых границ.* Такая сетка границ всегда имеется в слитках, сварных швах (до и после отжига) и в рекристаллизованных после деформации полуфабрикатах. Сетка высокоугловых границ отсутствует в деформированном состоянии и в монокристаллах. Минимальная  $T_{xp}$  наблюдается именно в этих двух состояниях.

Например, деформированный Mo подвергнутый дорекристаллизационному отжигу с полигонизованной структурой имеет  $T_{xp}=20^{\circ}\text{C}$ , а рекристаллизованный -  $T_{xp}=300-400^{\circ}\text{C}$ , соответственно деформированный молибден имеет определенный запас пластичности, а рекристаллизованный – абсолютно хрупкий.

$T_{xp}$  зависит и от тонкой дислокационной структуры, которая формируется в процессе деформации ТМ. Она может быть различной в зависимости от условий деформации: от схемы напряженного состояния в очаге деформации, от температуры, степени и скорости деформации.

Различают три разновидности дислокационных структур, которые формируются в процессе деформации.

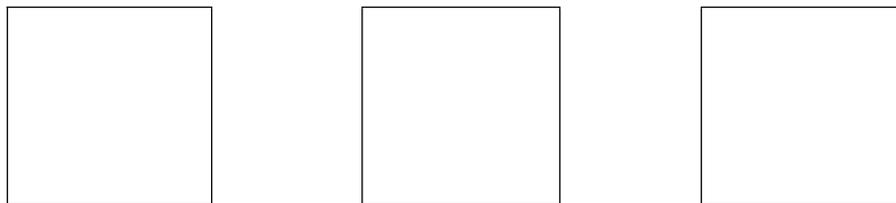


Рис. 4 Дислокационная структура металлов VIA группы в различных состояниях  
*а – субструктура деформированного Mo с гомогенным распределением дислокаций;*  
*б – ячеистая дислокационная структура деформированного Mo;*  
*в – полигонизованная структура деформированного молибденового сплава после дорекристаллизационного отжига*

**Субструктура I типа (рис. 4, а) характеризуется гомогенным распределением дислокаций.** Такая структура в ОЦК металлах формируется при низкотемпературной деформации с высокими скоростями. **Она дает минимальную пластичность и максимальную  $T_{xp}$ .**

**Субструктура II типа (рис. 4, б) – это ячеистая субструктура.** Она характеризуется неравномерным распределением дислокаций, которые сосредоточены в основном по стенкам ячеек, образуя объемные сплетения.

**Структура III типа (рис. 4, в) полигонизованная структура.** Границы субзерен (блоков) – это малоугловые границы, состоящие из дислокационных стенок или сеток.

**Максимальная пластичность достигается в случае полигонизованной структуры, а при наличии высокоугловых границ – в случае максимального измельчения зерен.**

Структуру III типа можно получить при горячей деформации с малыми степенями (прессование, экструзия), в процессе которой развивается **динамическая полигонизация**, а также применением **дорекристаллизационного отжига** (на возврат).

Известно, что  $T_{xp}$  снижается при уменьшении размера зерен ( $d$ ) в соответствии с уравнением (В. И. Трефилов):

$$\frac{1}{T_{xp}} = C_1 - C_2 \lg d$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – константы металла;  $d$  – размер зерен рекристаллизованного или литого металла, или размер субзерен для полигонизованного металла.

Кроме зеренной и дислокационной структуры твердого раствора на базе ТМ, **важным элементом структуры металлов VIA группы являются частицы избыточных фаз (карбидов, оксидов, нитридов).** В литом состоянии (слитки и сварные швы) выделения фаз кристаллизованного происхождения располагаются преимущественно вдоль границ зерен, часто в виде сплошных ободков. Это вызывает хрупкое межзеренное разрушение уже при высоких температурах ( $T_{xp} > 200 - 500^\circ\text{C}$ ). Если с помощью отжига слитка удастся хотя бы частично растворить

или сфероидизировать пограничные выделения, то  $T_{xp}$  снижается и деформационные возможности металла возрастают.

Важной отличительной особенностью металлов VIA группы является резко отрицательное влияние рекристаллизации на пластичность.

Все современные теории склонности ТМ к хрупкому разрушению связывают ее с *взаимодействием атомов примесей внедрения с дефектами кристаллической решетки – с дислокациями, границами зерен и блоков.*

Особенно велико это влияние в металлах VIA группы вследствие крайне малой растворимости примесей в этих металлах и особенностями их электронной структуры.

В результате *деформационного старения примеси внедрения образуют атмосферы Коттрелла, препятствующие скольжению дислокаций. В ОЦК металлах возможна эффективная блокировка примесями внедрения дислокаций всех видов*, в том числе и винтовых. *Это вызывает резкое повышение склонности ТМ к хрупкому разрушению.* Однако это не единственная причина хрупкости ТМ.

*Вторая причина перехода ТМ в хрупкое состояние связана с образованием равновесной сегрегации примесей на границах.*

*Движущей силой миграции атомов примесей к границам является уменьшение энергии искажения решетки вокруг них.*

Сегрегации примесей у границ, во-первых, приводят к усилению их барьерного действия у границ. Они затормаживают дислокации (типа источников Франка-Рида) по другую сторону от границы (рис. 5). В результате у границ скапливается большое количество дислокаций и резко возрастает опасность зарождения трещин вдоль границ. Кроме того, примеси понижают поверхностную энергию, что также способствует хрупкому межзеренному разрушению.



Рис. 5 – Схема торможения дислокаций у границы зерен при взаимодействии с сегрегацией примесей

В металлах VIA группы (Cr, Mo, W) охрупчивающее действие сегрегации примесей внедрения на высокоугловых границах настолько велико, что оно даже превышает эффект повышения пластичности за счет уменьшения плотности дислокаций в процессе рекристаллизации. В результате деформированные полуфабрикаты металлов VIA группы имеют более низкую температуру хрупко-вязкого перехода ( $T_{хр}$ ), чем после рекристаллизационного отжига.

У всех ТМ с увеличением размера зерен  $T_{хр}$  резко повышается (рис. 6). Однако при обычном для технических металлов размере зерен 20-30 мкм у ниобия она находится в области отрицательных температур, у молибдена – в районе комнатной температуры (0...+20°C), у вольфрама – при +150...+200°C. Ясно, что склонность у этих металлов к хладноломкости различна.

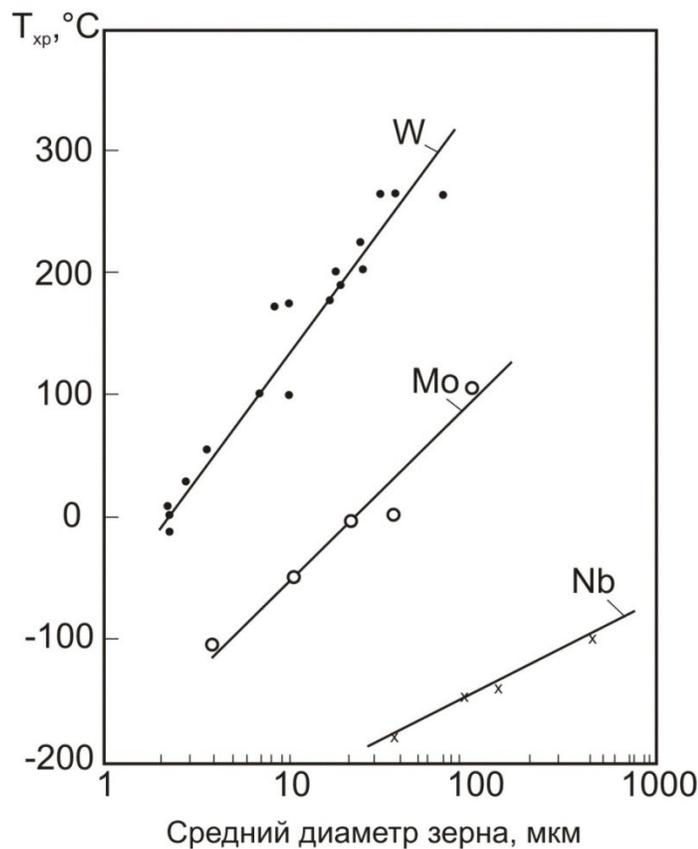


Рис. 6 – Влияние диаметра зерна на температуру перехода ТМ (Nb, Mo, W) из пластичного состояния в хрупкое

### 1.3 Способы снижения хладноломкости тугоплавких металлов

Таким образом, анализ данных о низкотемпературной хрупкости ТМ с ОЦК решеткой позволяет сформулировать основные способы снижения хладноломкости.

**1. Снижение концентрации примесей внедрения различными технологическими способами:** повышение степени вакуума и использование безмасляных вакуумных насосов в печах для плавки ТМ, раскисление при плавке, применение высокотемпературных вакуумных отжигов, применение зонной рафинировки и т.д.

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

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

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

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 (кривая 1 – рис. 7)



Рис. 7 – Схемы изменения температуры  $T_{хр}$  тугоплавких металлов при легировании

Некоторые легирующие элементы, введенные в малых количествах, снижают  $T_{хр}$ , однако дальнейшее увеличение их концентрации приводит к росту температуры хрупко-вязкого перехода (кривая 2, рис. 7).

Лишь один элемент Re снижает  $T_{хр}$  металлов VIA группы (Cr, Mo, W) в рекристаллизованном состоянии (кривая 3 рис. 7).

## **2. Механические свойства для определения жаропрочности ТМ**

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

Для количественной оценки характеристик жаропрочности металлов и сплавов используют несколько методов механических испытаний. Наиболее важным из них

*является испытание на длительную прочность и ползучесть.* Эти испытания проводятся по схеме одноосного растяжения.

### Испытания на длительную прочность

*Предел длительной прочности – это условные напряжения ( $\sigma$ ), под действием которого материал разрушается при данной температуре( $t$ ) за заданный промежуток времени( $\tau$ ).*

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

$$\sigma_{\tau, t}^t, \sigma_{1000}^{800} (t = 800 \text{ } ^\circ\text{C}, \tau = 1000 \text{ ч})$$

### Испытания на ползучесть

**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  $\sigma$  с двумя индексами: нижний соответствует заданной скорости ползучести( $V(\%/ч)$ ), верхний – температура испытания  $\sigma_{V/t/t}^{1000} \left( \sigma_{1 \cdot 10^{-4} \frac{\%}{ч}}^{1000} \right)$

#### *2. Ограничение по деформации ползучести*

В этом случае предел ползучести обозначается буквой  $\sigma$  с тремя индексами: верхний определяет температуру испытания( $t_{исп}$ ), два нижних – деформацию ( $\varepsilon$ ) и время ( $\tau$ ):  $\sigma_{\frac{\varepsilon}{\tau}}^{t_{исп}} \left( \sigma_{\frac{1}{1000}}^{800} = 100 \text{ МПа} \right)$

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

## Вопросы для самоконтроля

1. Какие факторы определяют разную склонность ТМ VA и VIA групп к хладноломкости?
3. Какая структура металлов VIA группы обеспечивают их минимальную склонность к хрупкому разрушению?
4. Как влияют примеси внедрения на низкотемпературную хрупкость ТМ с ОЦК-решеткой?
5. Какие существуют методы количественной оценки показателя хладноломкости – температуры хрупковязкого перехода –  $T_{xp}$ ?
6. Какие факторы называют внешними и какие внутренними, и как они влияют на температуру хрупко-вязкого перехода?
7. Какова природа низкотемпературной хрупкости ТМ с ОЦК-решеткой?
8. Какие известны способы снижения хладноломкости ТМ с ОЦК-решеткой?
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?
10. Дайте определение жаропрочности металлических материалов.
11. Какие методы механических испытаний используются для определения жаропрочности металлических материалов?
12. Что такое длительная прочность? Расшифруйте запись  $\sigma_{\square}^{t_{исп}}$  (например,  $\sigma_{100}^{1000}$ ) при испытаниях на длительную прочность.
13. Что такое ползучесть? Дайте определение ползучести при испытаниях металлических материалов. Расшифруйте запись  $\sigma_{\varepsilon/t}^t$  (например,  $\sigma_{1/1000}^{800}$ ).
14. Что такое длительная жаропрочность и как определяется? В каких случаях ее определение является обязательным?