

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

В. Г. Трощенко, Е. И. Усков, А. В. Бляк (Киев)

*Институт проблем прочности
Академии наук Украинской ССР*

Введение

При оценке работоспособности изделий из тугоплавких материалов наряду с такими общеприятными характеристиками механических свойств как предел прочности, предел текучести и др., большое значение приобретают также параметры, характеризующие сопротивляемость указанных материалов развитию в них трещин [1]. Это обусловлено специфическими свойствами тугоплавких материалов — наличием вносимых в материал технологически зернограничных микротрещин, склонностью к высокотемпературному охрупчиванию, ослабляющему зернограничную прочность, преимущественно межзерненным разрушением —, а также особыми условиями эксплуатации, отличающимися сложными режимами температурно-силового воздействия.

В настоящее время вопросы исследования высокотемпературной трещиностойкости тугоплавких материалов освещены в литературе недостаточно, в связи с чем работы в этом направлении являются актуальными и важными.

Материал и методика исследования

Для испытаний на трещиностойкость в широком интервале температур выбран вольфрам технической чистоты, полученный методом порошковой металлургии, в деформированном и рекристаллизованном состояниях. Рекристаллизованную структуру получали предварительным отжигом деформированного вольфрама при температуре 2200°C.

Испытания на трещиностойкость в интервале температур 20...2200°C проводили на разработанной в Институте проблем прочности АН УССР высокотемпературной вакуумной установке для испытаний на растяжение ВУРТ-1 [2], на которой осуществляли также рекристаллизационный отжиг образцов.

Для исследования использовали стандартные компактные образцы типа Е [3] на внецентренное растяжение, толщиной $6,5 \cdot 10^{-3}$ м. Обоснованием для выбора

образцов указанной толщины послужили экспериментальные данные, представленные на рис. 1. Как видно из рисунка, изменение толщины образца в пределах от $5 \cdot 10^{-3}$ м до $7 \cdot 10^{-3}$ м не оказывает влияния на величину параметра K_Q в диапазоне температур 20...2000°C (рис. 1, а); параметр K_Q , определенный на образцах толщиной $6,5 \cdot 10^{-3}$ м, не зависит от начальной длины исходной трещины Q_0 (рис. 1, б) и от величины прироста трещины ΔQ при повторных испытаниях одного образца при различных температурах (рис. 1, в).

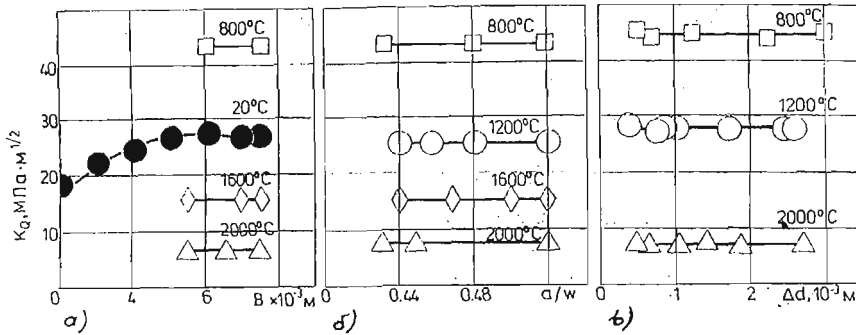


Рис. 1. Зависимость параметра K от толщины образца (а), длины исходной трещины (б) и величины подрастания трещины (в)

Полученные зависимости возможны лишь в том случае, когда коэффициент интенсивности напряжений K_Q принимает критическое значение, т. е. $K_Q = K_{Ic}$.

В пользу этого утверждения говорит и тот факт, что разрушение образцов вольфрама во всем исследованном температурном диапазоне было преимущественно хрупким, о чем свидетельствуют результаты фрактографического и рентгеноструктурного исследований [4 - 5].

Такой подход к выбору толщины образца обусловлен тем, что применяемые обычно для проверки корректности результатов размерные требования $a, W-a, B \geq 2,5 (K_{Ic}/\sigma_{0.2})^2$ [6], в случае вольфрама являются слишком жесткими и нуждаются в уточнении.

В процессе испытаний на трещиностойкость вольфрама строили диаграммы растяжения в координатах „нагрузка P — смещение V_p ”, обрабатывали их по стандартной методике 5% секущей [3, 6], определяя величину критической нагрузки срагивания трещины P_Q и коэффициент интенсивности напряжений K_Q .

Типичные диаграммы деформирования вольфрама в различных температурных диапазонах испытаний приведены на рис. 2. Характерные особенности каждой из диаграмм обусловлены особенностями развития магистральной трещины [7]. В температурном диапазоне $20^\circ\text{C} \dots T_{xp}^B$ (T_{xp}^B — верхняя граница температурной области вязко-хрупкого перехода) развитие трещины является нестабильным. При температурах, превышающих T_{xp}^B , стабильное развитие магистральной трещины может происходить либо по механизму разветвления (в диапазоне $T_{xp}^B \dots 1500^\circ\text{C}$), который отличается дискретным подрастанием трещины, либо путем непрерывного интеркристаллитного устойчивого роста трещины при температурах, превышающих

1500°C. Найденные при обработке диаграмм деформирования значения P_Q (на рис. 2 P_S — нагрузка, при которой длина трещины увеличивается на 2%) подставляли в формулу (I) для определения критического коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} , который был выбран в качестве параметра трещиностойкости вольфрама

$$K_{Ic} = \frac{P_Q Y(a_0/w)}{B\sqrt{W}} \quad (I)$$

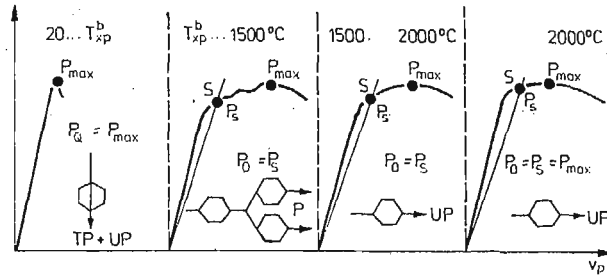


Рис. 2. Типичные диаграммы деформирования вольфрама и схематическое представление транскристаллитного TP , интеркристаллитного IP раздушения и разветвления трещины P .

где $y(a_0/W)$ — коэффициент, учитывающий геометрию образца, B, W — толщина и ширина образца соответственно.

Результаты испытаний и их обсуждение

На рис. 3 показана температурная зависимость трещиностойкости K_{Ic} деформированного вольфрама (кривая 1) и схематическое представление характера развития магистральной трещины (обозначения те же, что и на рис. 2). Здесь же при-

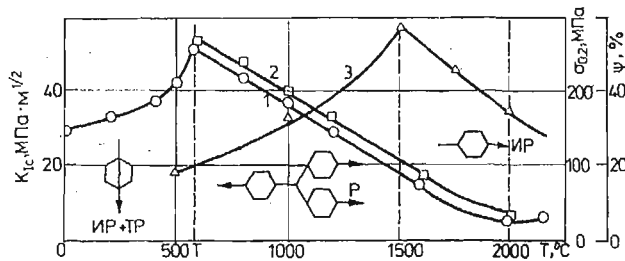


Рис. 3. Температурные зависимости трещиностойкости I и характеристик кратковременной прочности $\sigma_{0,2}$ (2), (3) деформированного вольфрама

ведены температурные зависимости предела текучести $\sigma_{0,2}$ (кривая 2) и характеристики пластичности Ψ (кривая 3) этого материала. Штриховыми линиями выделены температурные диапазоны, соответствующие характерным участкам на указанных зависимостях.

В температурном диапазоне $20^\circ\text{C} \dots T_{xp}^B$ наблюдается возрастание K_{Ic} с ростом температуры при неустойчивом хрупком смешанном разрушении. Диапазон $T_{xp}^B \dots 2000^\circ\text{C}$ отличается монотонным снижением параметра трещиностойкости K_{Ic} и предела текучести $\sigma_{0,2}$ и устойчивым хрупким интеркристаллитным разрушением, которое характеризуется разветвлением магистральной трещины (в диапазоне $T_{xp}^B \dots 1500^\circ\text{C}$) или непрерывным устойчивым ее подрастанием (в диапазоне $1500^\circ\text{C} \dots 2200^\circ\text{C}$). При температурах, превышающих 2000°C имеет место незначительное возрастание параметра K_{Ic} и зернограничное растрескивание материала.

Анализируя представленные на рис. 3 результаты, можно отметить как аномальные следующие особенности: снижение K_{Ic} с повышением температуры в диапазоне $T_{xp}^B \dots 2000^\circ\text{C}$ и отсутствие каких-либо изменений (перегибов) на зависимостях $K_{Ic} = f(T)$ и $\sigma_{0,2} = f(T)$ при температуре 1500°C , хотя при этой температуре имеется экстремум на зависимости $\Psi = f(T)$ и изменяется характер развития исходной трещины. Следует отметить также и другие особенности представленных на рис. 3 зависимостей: корреляция характеристик K_{Ic} и $\sigma_{0,2}$, аномальный ход зависимости $\Psi = f(T)$ по отношению к $\sigma_{0,2}$ при $T < 1500^\circ\text{C}$ и по отношению к K_{Ic} при $T < 1500^\circ\text{C}$.

Структурные исследования испытанных образцов показали, что в диапазоне температур $T_{xp}^B \dots 2000^\circ\text{C}$ происходит монотонное совершенствование структуры, причем в окрестности температуры 1500°C отсутствуют какие-либо структурные изменения, свидетельствующие об охрупчивании (снижении Ψ) вольфрама.

Однозначно истолковать указанные противоречивые данные, используя существующие представления о физических процессах, протекающих в вольфраме при нагреве, не представляется возможным.

В работе [8] предложено объяснить выявленную противоречивость представленных на рис. 3 данных действием внутренних структурных напряжений [9], возникающих в материале при термическом воздействии.

На рис. 4 схематически показано, как влияют на трещиностойкость W в диапазоне температур $T_{xp}^B \dots 2200^\circ\text{C}$ процессы повышения пластичности с ростом температуры и одновременного ослабления межзеренных границ вследствие возникающего при нагреве W поля напряжений. Эти процессы оказывают противоположное воздействие на трещиностойкость W : с увеличением пластичности тре-

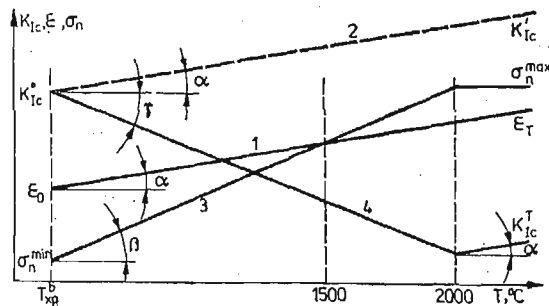


Рис. 4. Влияние пластичности и поля внутренних напряжений на трещиностойкость деформированного вольфрама

щностойкость должна возрастать (кривые 1 и 2), а с ростом поля напряжений — уменьшаться (кривые 3 и 4).

Для простоты в схеме приняты следующие допущения: параметр σ_n , характеризующий поле внутренних напряжений, с повышением температуры возрастает более резко, чем параметр ε , характеризующий пластичность материала ($\text{tg}\beta < \text{tg}\alpha$); изменение трещиностойкости материала находится в прямой зависимости от изменения его пластичности.

При повышении температуры с увеличением пластичности (кривая 1) должна увеличиваться и трещиностойкость (кривая 2). Однако более резкое возрастание поля внутренних напряжений (кривая 3) приводит к тому, что трещиностойкость уменьшается (кривая 4; $\text{tg}\gamma = \text{tg}\beta - \text{tg}\alpha$).

Вследствие ослабления межзеренных границ под влиянием поля напряжений разрушение происходит при частичной реализации материалом пластичности. Конкуренция двух указанных процессов приводит к смене механизмов разрушения ($P \rightarrow IP$) и снижению Ψ при температурах выше 1500°C . При $T \geq 2000^\circ\text{C}$ напряжения достигают предела прочности материала, вызывая интенсивное зернограничное растрескивание. При дальнейшем повышении температуры величина поля напряжений остается практически постоянной вследствие релаксации зернограничным растрескиванием ($\sigma_n = \sigma_n^{\text{max}} = \text{const}$) и трещиностойкость материала несколько возрастает, т. к. K_{Ic} зависит только от изменения пластичности материала.

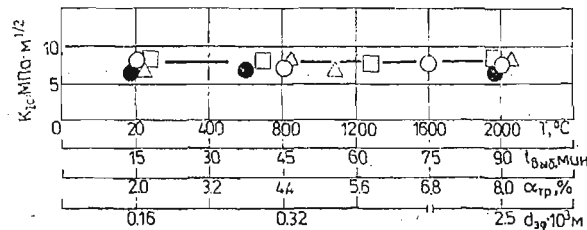


Рис. 5. Температурная зависимость трещиностойкости рекристаллизованного вольфрама

Описанные выше закономерности изменения трещиностойкости вольфрама, полученного методом порошковой металлургии, в исследованном интервале температур $20 \dots 2200^\circ\text{C}$ характерны для материала в деформированном состоянии.

Высокотемпературный отжиг при $T = 2200^\circ\text{C}$, с целью создания рекристаллизованной структуры, независимо от времени выдержки $t_{\text{выд}}$, обусловил необратимое снижение трещиностойкости деформированного вольфрама, величина которой остается неизменной во всем исследованном температурном интервале от 20 до 2200°C (рис. 5). Кроме того, на величину K_{Ic} рекристаллизованного W не влияют ни температура испытаний T , ни такие структурные параметры как эффективный размер зерна $d_{\text{эф}}$ (в пределах от $0,16 \cdot 10^{-3}$ м до $2,5 \cdot 10^{-3}$ м) и плотность микротрещин α_{T_p} (при $\alpha_{T_p} < 8\%$).

Характерная особенность поверхностей разрушения как образцов, испытанных при 2200°C , так и предварительно отожженных при 2200°C и испытанных при более низких температурах — протяженные зернограничные микротрещины, ко-

торые отсутствовали в исходном материале и не наблюдались на изломе образцов, испытанных при 2000°C.

Существенное различие характеристик трещиностойкости деформированного и рекристаллизованного вольфрама не противоречит имеющимся в литературе данным о резком отличии характеристик прочности и пластичности вольфрама с различной исходной структурой [10], что объясняется значительно более низкой прочностью границ зерен по сравнению с телом зерна в рекристаллизованном вольфраме.

Выводы

1. Отсутствие влияния на величину параметра K_Q толщины образца (в пределах от $5 \cdot 10^{-3}$ м до $7 \cdot 10^{-3}$ м), длины исходной трещины и величины прироста трещины, а также хрупкий характер разрушения (прямой излом, отсутствие утяжки в вершине трещины) в исследованном диапазоне температур (20...2000°C), дают основание для применения компактных образцов малой толщины (более $5 \cdot 10^{-3}$ м) при определении характеристик трещиностойкости вольфрама с использованием критериев линейной механики разрушения.

2. Характерной особенностью температурной зависимости K_{Ic} для деформированного вольфрама является наличие экстремума в области температуры хрупко-вязкого перехода T_{xp}^B , монотонное снижение величины K_{Ic} в температурном диапазоне T_{xp}^B ...2000°C, коррелирующее с изменением предела текучести $\sigma_{0,2}$, при наличии экстремума на температурной зависимости характеристики пластичности ψ при 1500°C, что объясняется взаимодействием двух протекающих в вольфраме при нагреве процессов — пластификации материала и ослабления зернограницной прочности вследствие действия внутренних структурных напряжений.

3. Высокотемпературный отжиг при 2200°C приводит к существенному снижению трещиностойкости вольфрама, причем на величину K_{Ic} рекристаллизованного вольфрама не оказывают влияние ни температура, ни такие структурные параметры как эффективный размер зерна и плотность микротрещин, что объясняется необратимым снижением зернограницной прочности материала при высокотемпературном воздействии.

Литература

1. А. В. БАБАК, О количественной корреляции между трещиностойкостью K_{Ic} и кратковременной прочностью σ_b , $\sigma_{0,2}$ вольфрама-Порошковая металлургия, № II, с. 68 - 72, 1983.
2. А. В. БАБАК, Е. И., Усков, Установка для исследования характеристик вязкости разрушения тупоугольных материалов при высоких температурах в вакууме или инертной среде, Завод. лаб., т. 46, № 10, с. 955 - 956, 1980.
3. К. ХЕККЕЛЬ, Техническое применение механики разрушения. М.: Металлургия, 63 с. 1974.
4. В. А. СТЕПАНЕНКО, А. В. БАБАК, Е. И. Усков, Фрактографические особенности разрушения металлокерамического вольфрама в интервале температур 20...2000°C, Пробл. прочности, № 9, с. 88 - 90, 1982.

5. Н. Д. Бегл, А. В. Бабак, Е. И. Усков, *Рекристаллизация и охрупчивание спеченого вольфрама*, Порошковая металлургия, № 5, с. 75 - 79, 1982.
6. У. Браун, Дж. Сроули, *Испытание высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации*, М.: Мир, 246 с. 1972.
7. Е. И. Усков, А. В. Бабак, *Особенности разрушения металлокерамического вольфрама при различных температурах в вакууме*, Пробл. прочности, № 1, с. 79 - 82, 1981.
8. Бабак А. В., Усков Е. И. К вопросу о высокотемпературном охрупчивании вольфрама Пробл. прочности, № 5, с. 65 - 69, 1983.
9. Е. Э. Засимчук, В. С. Кравченко, *Механизм охрупчивания ОЦК-металлов в процессе динамической рекристаллизации*. — В кн.: Тез. докл. 4-й Всесоюз. конф. „Физика разрушения”. Киев: Ин-т Пробл. Материаловедения АН УССР, с. 28 - 30, 1980.
10. В. М. Амосов, Р. Т. Андреева, М. Н. Фомина, *Влияние металлов IУА, УА и УІА групп периодической системы на свойства вольфрама марки ВА*. В кн.: Порошковая металлургия в новой технике. М.: Наука, с. 121 - 128, 1968.

Streszczenie

ODPORNOŚĆ NA PĘKANIE TRUDNOTOPLIWYCH METALI I STOPÓW

Przedstawione zostały wyniki badań odporności na pękanie odkształcanego i rekrystalizowanego wolframu technicznej czystości w zakresie temperatury 20 - 2000°C.

Charakterystyczną cechą zależności temperaturowej K_{Ic} dla odkształcanego wolframu jest obecność ekstremum przy temperaturze krucho-lepkiego przejścia T_{xp}^B i obniżenia K_{Ic} w zakresie $T_{xp}^B \dots 2000^\circ\text{C}$, a dla rekrystalizowanego niezależność K_{Ic} od temperatury i parametrów strukturalnych (efektywny rozmiar ziarna i gęstość mikroszczelin). Specyfikę zmiany odporności na pękanie wolframu można objaśnić wzajemnym oddziaływaniem dwóch procesów — uplastycznienia materiału i osłabienia wytrzymałości na granicy ziaren.

Summary

FRACTURE TOUGHNESS OF HIGH-MELTING METALS AND ALLOYS

Results of the research in the fracture toughness of deformed and recrystallized wolfram of technical purity are presented for the temperature range 20 - 2000°C.

The characteristic feature of the temperature dependence K_{Ic} for the deformed wolfram is the presence of an extremum of the temperature of brittle-viscous transition T_{xp}^B and the decrease of K_{Ic} in the range $T_{xp}^B \dots 2000^\circ\text{C}$ while the independence K_{Ic} of the temperature and structural parameters (effective grain dimension density of microcracks). The specific features of the wolfram fracture toughness can be explained by the interaction of the two processes, namely the material plastification and weakening of the inter grain strength.

Praca została złożona w Redakcji dnia 20 kwietnia 1985 roku