

Исследование прочности на изгиб дисперсионных материалов из двуокиси урана и молибдена в интервале температур 293—1870°К

КАКУШАДЗЕ Л. Е., КОТЕЛЬНИКОВ Р. Б.

УДК 621.039.542.33

Работоспособность сердечников дисперсионных твэлов в большой степени зависит от их механической прочности. Прочность керамических материалов обычно определяется испытаниями на изгиб или сжатие.

Для исследования были использованы керметы из покрытых молибденом частиц двуокиси урана диаметром $—315 \pm 200$ мкм и смеси крупки двуокиси урана с молибденовым порошком. Технология изготовления и некоторые свойства исследованных материалов описаны в работе [1]. Сначала горячим прессованием изготавливались заготовки в виде цилиндров диаметром 10 и высотой 20 мм. Из каждой заготовки алмазным диском без применения охлаждающей жидкости вырезалось по четыре прямоугольных образца сечением 3×3 и длиной 15 мм. В поперечном сечении каждого такого образца содержится около 150 частиц двуокиси урана. В. И. Третьяков [2] по ряду соображений считает, что при испытании на изгиб керметов типа твердого сплава ВК (вольфрам — кобальт) допустимо отношение величины расстояния между опорами к толщине образца, равное 3—4. В проведенных опытах эта величина составляла 3,43. Следы обработки, получившиеся на поверхности образца в процессе алмазной резки, имели продольное направление. Образцы с поверхностными дефектами шлифовались всухую вдоль оси на наждачной бумаге М-20. Во всех случаях у образца оставалась нетронутой после алмазной обработки хотя бы одна грань. При испытаниях образец устанавливался на опорах так, чтобы растяжению подвергалась грань, обработанная алмазом. Таким образом, можно считать, что все образцы имели одинаковую механическую обработку поверхности — алмазную с направлением следов обработки вдоль главной оси. Термообработка после резки образцов не проводилась. Плотность образцов составляла $96 \pm 1,2\%$ теоретической. Схема нагружения и нагрева образца показана на рис. 1. Расстояние между вольфрамовыми опорными призмами составляло 10,3 мм. Нагружение образца осуществлялось со скоростью $4,08 \times 10^5$ н/м²·сек (или 2,5 кг/мм²·мин). Образец нагревали излучением при помощи ленточного нагревателя, через который пропускали пере-

менный ток промышленной частоты. Для уменьшения утечек тепла высокотемпературная зона защищена системой экранов. Температуру поверхности образца измеряли пирометром ОППИР-09 через отверстия в экранах и нагревателе. Пирометр предварительно градуировали по платино-платинородиевой термопаре, прикрепленной к образцу. В качестве рабочей среды при испытаниях применяли гелий высокой чистоты с содержанием примесей (по паспорту) около 0,012 об.%. Перед запуском в установку гелий дополнительно очищали, последовательно пропуская через силикагель, медную стружку (1000°К), силикагель. Неизменность параметров решетки фаз керметов и цвета поверхности образцов после высокотемпературных опытов свидетельствовала о достаточной для выполнения данной задачи чистоте гелия. Во время опытов избыточное давление гелия в камере печи составляло $5 \cdot 10^2$ н/м² (или

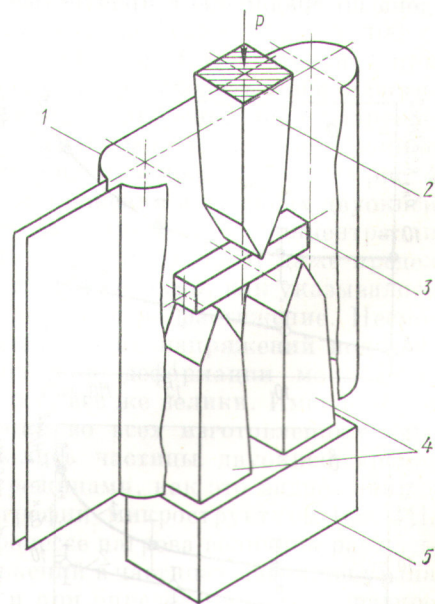


Рис. 1. Схема установки для испытания на изгиб:

1 — нагреватель из танталовой жести; 2 — нагружающая призма из вольфрама; 3 — образец; 4 — опорные призмы из вольфрама; 5 — колодка из молибдена.

3,7 мм рт.ст.), а скорость протока через камеру объемом около $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ равна $4,2 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{сек}$. При каждой температуре испытывалось не менее трех-четырех образцов из данной партии. Прочность на изгиб вычислялась по общеизвестной формуле. При осмотре разрушенных образцов не обнаружено заметного прогиба даже после испытания при 1870° К . Разрушение происходило в плоскости, перпендикулярной к главной оси образца. Вне зависимости от типа кермета, состава и температуры испытания излом происходил поперек частиц двуокиси урана. Не замечено какого-либо преимущественного разрушения по молибденовым прослойкам или «вылущивания» частиц двуокиси урана из молибденовой матрицы. Указанные на рис. 2 и 3 отклонения от среднего значения соответствуют среднеквадратическим отклонениям экспериментальных точек для данного типа кермета. Из приведенных результатов могут быть сделаны следующие выводы.

Во всем исследованном интервале составов и температур кермет из покрытых частиц прочнее кермета из смеси.

В интервале температур $293-1500^\circ \text{ К}$ наблюдается тенденция к возрастанию прочности керметов обоих типов при увеличении концентрации молибдена. Причиной этого является, по-видимому, более высокая прочность молибдена по сравнению с прочностью двуокиси ура-

на, что видно из рис. 4. Здесь следует иметь в виду, что экспериментально определяемая прочность при изгибе может быть в несколько раз выше прочности при растяжении несмотря на то, что в обоих случаях разрушающими являются растягивающие напряжения. Например, в [3] при исследовании материала на основе карбида кремния в интервале температур $290-1670^\circ \text{ К}$ показано, что прочность при изгибе в 2,5 раза выше, чем при растяжении. Следовательно, прочность двуокиси урана при растяжении должна иметь значения, расположенные ниже линий 1—3 на рис. 4.

При увеличении температуры от 293 до 1500° К наблюдается тенденция к росту прочности керметов обоих типов. В [4] на основании исследования ряда веществ показано, что прочность хрупких материалов при нагреве увеличивается вследствие появления некоторой пластичности, за счет которой снимается концентрация напряжений и возможно выявление полной прочности материала. Температурная область максимальной прочности хрупких материалов составляет при растяжении $0,5-0,8$, а при сжатии $0,5-0,7$ абсолютной температуры плавления. Можно утверждать, что прочность керметов с увеличением температуры повышается, в основном, за счет роста прочности двуокиси урана (см. рис. 4) и уменьшения микронапряжений в кермете. Прочность молиб-

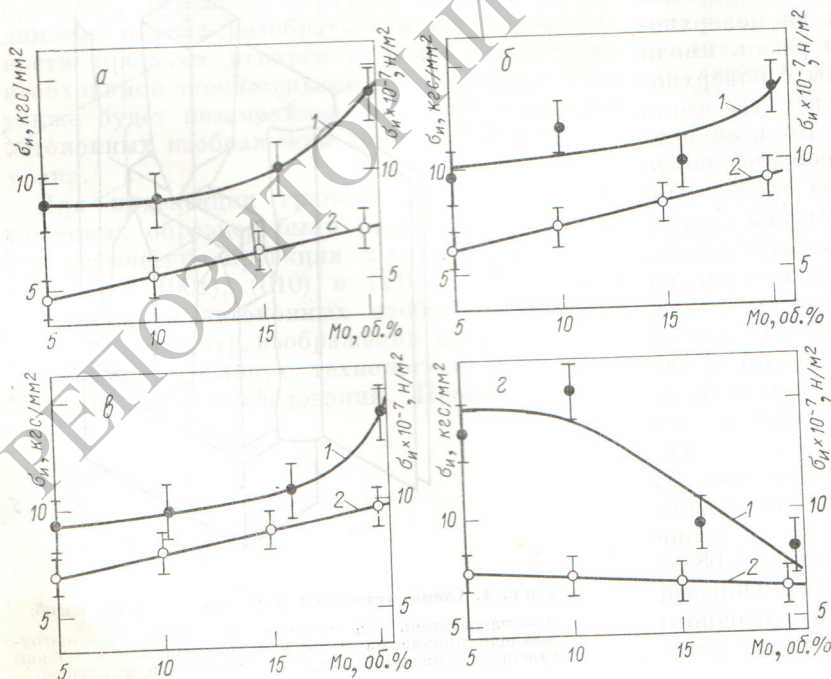
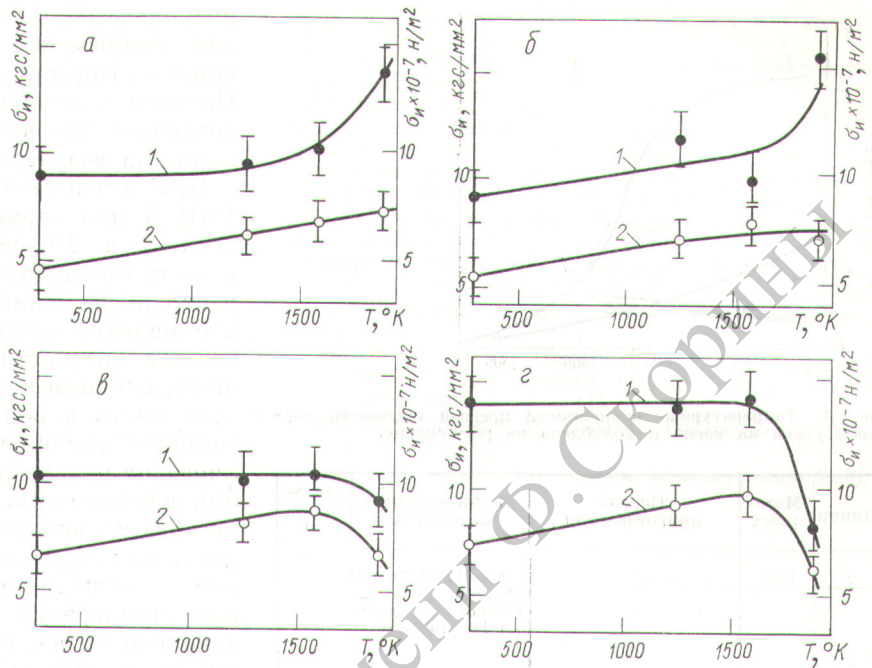


Рис. 2. Зависимость прочности на статический изгиб керметов из двуокиси урана и молибдена от состава при разных температурах, $^\circ \text{ К}$: а — 293; б — 1240; в — 1570; г — 1870.

1 — кермет из покрытых молибденом частиц; 2 — кермет из смеси.

Р и с. 3. Зависимость прочности на статический изгиб керметов из двуокиси урана и молибдена разных составов от температуры.

1 — кермет из покрытых молибденом частиц; 2 — кермет из смеси. Концентрация молибдена в керметах соответственно: а — 5,2 и 5; б — 10,3 и 10; в — 16,0 и 15; г — 20,3 и 20 об. %.



дена с увеличением температуры заметно уменьшается. Несмотря на это, в определенном интервале температур прочность керметов все же может возрастать за счет увеличения прочности двуокиси урана, так как концентрация молибдена не очень велика. Коэффициент термического расширения двуокиси урана примерно в два раза выше молибдена. Поэтому при охлаждении образцов в процессе изготовления в микрообъемах кермета возникают напряжения. Подобная задача о напряжениях в двухфазной системе теоретически решена в [5], и результаты подтверждены при исследовании микронапряжений в карбидной фазе сплава типа ВК рентгеновским способом [6]. Результаты расчета для керметов из покрытых молибденом частиц двуокиси урана приведены на рис. 5. Для расчета принималось, что $E_{Mo} = 2,94 \cdot 10^{11} \text{ н/м}^2$ [7], $E_{UO_2} = 1,71 \cdot 10^{11} \text{ н/м}^2$ [8], $\mu_{Mo} = \mu_{UO_2} = 0,3$. Сведения о термическом расширении фаз заимствованы из работ [9] и [10]. В процессе охлаждения в двуокиси урана, испытывающей «гидростатическое» давление со стороны молибдена, все три главных напряжения равны между собой, а в молибдене определяющими являются скалывающие напряжения τ , достигающие максимума на внутренней, прилегающей к двуокиси урана части покрытия. При высоких температурах происходит релаксация напряжений. При охлаждении кермета ниже температуры рекристаллиза-

ции молибдена ($\sim 1270^\circ \text{K}$) процесс снятия напряжений прекращается. Величина напряжений не должна превышать предела текучести для молибдена и предела прочности на разрыв для двуокиси урана. При 293°K предел текучести молибдена составляет $70 \cdot 10^7 \text{ н/м}^2$ [7], что ниже подсчитанного значения $\tau_{\text{макс}} \approx 100 \times 10^7 \text{ н/м}^2$ (см. рис. 5). Следовательно, при охлаждении должна происходить либо пластическая деформация молибдена, либо разрушение двуокиси, либо разрушение по границе между двуокисью урана и молибденом. Из рис. 4 и 5 видно, что напряжения в частицах двуокиси урана, во всяком случае при концентрации молибдена ≥ 10 об. %, превышают даже предел прочности на изгиб, который, как указывалось ранее, выше прочности на растяжение. Несмотря на уменьшение этих напряжений под действием пластической деформации молибдена, они, по-видимому, все же велики. Именно из-за этих напряжений во всех изготовленных керметах наблюдались трещины, как это видно, например, на фотографии микроструктуры (см. [1], рисунок). В процессе нагрева величина растягивающих напряжений в частицах двуокиси урана уменьшается, и при определенной температуре в них могут возникнуть сжимающие напряжения, которые хрупкие материалы выдерживают значительно лучше. В таком состоянии кермет можно сравнить с предварительно напряжен-

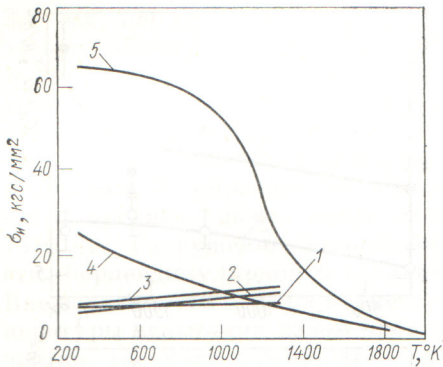


Рис. 4. Температурные зависимости предела прочности двуокиси урана на изгиб и молибдена на растяжение.

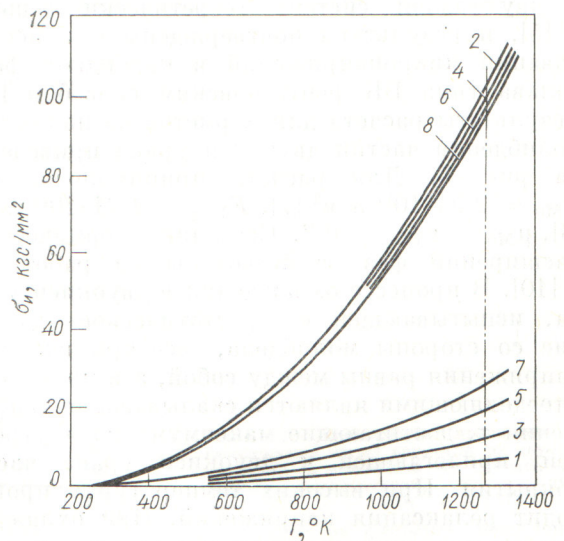
Линии	Материал	Способ приготовления	Характеристика материала	Литература
1	UO ₂	Прессование на холоде и спекание в аргоне при 2270° К в течение 30 мин. Размер образцов 38,1×6,4×3,2 мм	γ=84,3% теор. Размер частиц исходного порошка 10-15 мкм	[11]
2	UO ₂		γ=90% теор. Размер частиц исходного порошка 10-15 мкм	
3	UO ₂		γ=92,8% теор. Размер частиц исходного порошка 0-5 мкм	
4	Mo	Прессование порошка, спекание, горячая прокатка, рекристаллизация	Чистота исходного порошка 99,98%	[12]
5	Mo	Тот же материал, без рекристаллизации		

Рис. 5. Зависимость термических напряжений в фазах керметов при 293° К от температуры, при которой они перестают релаксироваться в процессе охлаждения.

Линии	1	2	3	4	5	6	7	8
Концентрация Mo, об. %	5	10	15	20				
Фаза	UO ₂	Mo	UO ₂	Mo	UO ₂	Mo	UO ₂	Mo

ным железобетоном. Под действием сжимающих напряжений зарастают трещины, возникшие в частицах двуокиси урана при охлаждении. Поэтому с повышением температуры до определенного предела прочность исследованных керметов возрастает.

При увеличении температуры от 1500 до 1870° К для керметов с концентрацией молибдена 5 и 10 об. % наблюдается тенденция к росту прочности, а прочность керметов с концентрацией молибдена 15 и 20 об. % падает. Это явление вызывается, по-видимому, уменьшением прочности чистого молибдена до величины, меньшей прочности двуокиси урана. Следует иметь в виду, что площадь поверхности соприкосновения частиц двуокиси урана с молибденом больше площади диаметрального сечения в четыре раза. Поэтому разрушение совсем не обязательно должно происходить по молибдену, как наиболее слабой фазе. При испытании разрушение во всем исследованном интервале температур происходит поперек частиц двуокиси урана, как отмечено ранее. Уменьшение прочности молибдена мало сказывается на прочности образцов с его низкой концентрацией, а образцы с высокой концентрацией теряют прочность. Кроме того, молибден, входящий в состав керметов, как обоснованно предположено при объяснении проводимости [1], должен содержать примеси урана и кислорода из двуокиси. Прочность такого твердого раствора при высоких температурах может быть выше чистого молибдена. Так как примеси проникли в молибденовые прослойки только на



определенную глубину, то при малой концентрации молибдена они состоят целиком из твердого раствора, а при большой — в значительной степени из чистого молибдена. Поэтому с увеличением концентрации молибдена влияние примесей уменьшается и прочность при высоких температурах падает.

Поступила в Редакцию 12/IV 1973 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Какушадзе Л. Е., Котельников Р. Б. «Атомная энергия», 1974, т. 36, вып. 1.
2. Третьяков В. И. Металлокерамические твердые сплавы. М., Металлургиздат, 1962.
3. Руденко В. И. «Порошковая металлургия», 1961, № 4, с. 86.
4. Савицкий Е. М. Влияние температуры на механиче-

- ские свойства металлов и сплавов. М., Изд-во АН СССР, 1957.
5. Зайцев Г. П. «Физ. металлов и металловедение», 1956, т. II, вып. 3, с. 494.
 6. Ковальский А. Е. и др. В сб. материалов по металлотоведению и технологии изготовления металлокерамических твердых сплавов, тугоплавких металлов и материалов на их основе. Под ред. В. Ф. Функе. М., Изд. ЦИИцветмет, 1963, ч. II, с. 29.
 7. Молибден. Перев. с англ. Под ред. А. К. Натансона. М., Изд-во иностр. лит., 1959.
 8. Материалы для ядерных реакторов. Перев. с англ. Под ред. Ю. Н. Сокурского. М., Госатомиздат, 1963.
 9. Uranium dioxide. Ed by J. Belle. USAEC, Washington, 1961.
 10. Coldstith A. e. a. Handbook of Thermophysical Properties of Solid Materials. Oxford — Paris, Pergamon Press, 1961, v. I — III.
 11. Burdick M., Parker H. J. Amer. Ceram. Soc., 1956, v. 39, № 5, p. 180.
 12. Мордайт Б. Л. «Пробл. соврем. металлургии», 1960, № 4, с. 149.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Авторы, направляющие свои рукописи в журнал «Атомная энергия», должны руководствоваться следующими требованиями:

1. Тексты и иллюстративные материалы представляются в четырех экземплярах в окончательно отработанном для печати виде.

Содержание статьи должно быть изложено с предельной ясностью и краткостью. Следует избегать повторения данных таблиц и графиков, а также представления численных результатов в виде таблиц и графиков одновременно.

2. Объем обзорных статей, как правило, не должен превышать 20—22 стр., оригинальных статей—10—12 стр., аннотаций депонированных статей—2 стр., писем в редакцию—5 стр. машинписного текста (включая рисунок с подписями, таблицы и библиографию).

3. К статьям и письмам в редакцию должны быть приложены рефераты, составленные по правилам реферативных журналов, с четко сформулированной целью и результатами работы.

4. Статьи и рисунки должны быть подписаны всеми авторами. Необходимо указывать точный адрес, номер телефона, фамилию, полное имя и отчество авторов.

5. Названия всех работ, присылаемых в редакцию, должны быть переведены на английский язык, фамилии и инициалы авторов даны в английской транскрипции. Кроме того, рефераты к статьям должны быть переведены на английский язык (в строгом соответствии с русским рефератом).

6. Цитируемая литература приводится в конце работы общим списком с указанием:

а) для журнальных статей: фамилий и инициалов авторов, названия статьи, названия журнала, года, номера тома, выпуска и страницы;

б) для книг: фамилий и инициалов авторов; полного названия книги, места издания, издательства и года издания; для иностранных книг указываются также данные русского перевода;

в) для статей в сборниках: фамилий и инициалов авторов статьи, названия статьи, названия сборника, инициалов и фамилии составителя или редактора сборника, части, выпуска, места издания, издательства, года и страницы.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

7. Текст рукописей должен быть напечатан на машинке через два интервала по 28—29 строк на одной стороне листа с полями не уже 4 см; рукописные вставки не допускаются.

8. Оформление текста (написание формул, выделение греческих и латинских, строчных и прописных букв, сокращение слов и т. д.) производится в соответствии с общими правилами, принятыми для научно-технических журналов, трудно различимые в рукописном обозначении буквы и знаки должны быть пояснены на полях.

9. Прилагаемые к тексту таблицы нумеруются по порядку, каждая таблица должна иметь заголовки.

10. Рисунки выполняются черной тушью на бумаге размером 15 × 20 см; фотографии должны иметь контрастные изображения, размер фотографии 12 × 18 см.

11. Подписи к рисункам прилагаются на отдельном листе. В тексте должны быть ссылки на рисунки.

12. Редакция посылает автору только одну корректуру, которую необходимо вернуть в предельно короткий срок.

Рукописи, не соответствующие этим требованиям, не рассматриваются. Отклоненные статьи не возвращаются.