

## ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ГОРЯЧЕПРЕССОВАННОГО БЕРИЛЛИЯ

*И.И. Папиров, П.И. Стоев, А.А. Николаенко, Ю.В. Тузов\*, А.М. Хомутов\**  
*ННЦ «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина*

*E-mail: stoev@kipt.kharkov.ua;*

*\*ОАО «Институт физико-технических проблем», Дубна, МО, Россия*

С позиций концепции остаточных термических микронапряжений (ОТМ) проанализированы имеющиеся к настоящему времени результаты измерения вязкости разрушения бериллия  $K_{IC}$  при комнатной температуре, а также объяснены трудности, возникающие при создании усталостной трещины в бериллии. Показано, что величина предложенного в концепции ОТМ коэффициента однородности структуры  $f_c$  является интегральной оценкой работоспособности изделий из бериллия и важным параметром, определяющим способность материала сопротивляться распространению в нем трещин.

### ВВЕДЕНИЕ

Многолетние совместные исследования (ННЦ ХФТИ, ВНИИНМ, УМЗ), направленные на разработку новых бериллиевых материалов для атомной и авиакосмической техники, позволили установить основные пути существенного улучшения их эксплуатационных характеристик [1].

В процессе этих исследований установлено, что на регистрируемый уровень физико-механических свойств и их разброс (в образцах бериллия одной партии и различных партий одного сорта) существенно влияют остаточные внутренние микронапряжения, которые возникают в материале в процессе механико-термических обработок.

В данной работе с позиций концепции ОТМ проанализированы результаты, которые получены при изучении вязкости разрушения промышленных сортов бериллия, и значения критериев работоспособности бериллиевых материалов.

В настоящее время использование бериллия в технике ограничивается изделиями, несущими исключительно физические функции – отражение и замедление нейтронов (ядерная техника), поглощение тепла (тормозные колодки и теплозащитные экраны в авиакосмической технике), размерная стабильность (гироскопы), термопрочность (ядерные и термоядерные реакторы) и т.п. [1-5]. В то же время использование бериллия в нагруженных деталях конструкций требует предварительных расчетов предельного равновесия материала с трещинами и экспериментального определения абсолютных значений его вязкости разрушения.

Испытания бериллия на вязкость разрушения на образцах для внецентренного растяжения (например, по стандартам ASTM E 399-09, E 1820-09, E 1290-08) сопряжено с необходимостью создания усталостной трещины в вершине надреза, что вызывает значительные трудности из-за преждевременного разрушения образцов [2].

В работе [5] проведены измерения вязкости разрушения  $K_{IC}$  различных промышленных сортов бериллия в области температур  $-196...300$  °С без введения усталостной трещины. Отклонение от стан-

дарты испытания обосновывалось тем, что в процессе растяжения при нагрузках  $0,95 K_{IC}$  авторы оптическими методами фиксировали образование микротрещины в области перед надрезом образца.

Рассмотрим полученные экспериментальные результаты [5] с позиций концепции ОТМ [6-8], более известной как модель механических свойств бериллия. Из этой модели следует, что:

- в поликристаллическом бериллии существует линейная зависимость между пределом прочности и величиной ОТМ – прочность возрастает с увеличением ОТМ [6];

- величина ОТМ, в основном, зависит от возможности зернограничного проскальзывания, которая, в свою очередь, зависит от количества и степени дисперсности зернограничных включений оксида и интерметаллидов в бериллии [8];

- уровень механических свойств бериллия связан с коэффициентом однородности структуры  $f_c$ .

Коэффициент  $f_c$  характеризует степень отклонения значения механических свойств конкретного материала от некоторой «идеальной» кривой в координатах предел прочности–относительное удлинение, построенной на базе модельных представлений и статистической базы экспериментальных данных. Экспериментальная зависимость  $\delta$ - $\sigma_B$ , по сути, представляет собой огибающую некоторого множества точек, каждая из которых – результат единичного измерения механических свойств различных сортов бериллиевых материалов. Предполагалось, что экспериментальные точки, лежащие ниже кривой, соответствуют материалам с различными структурными дефектами, а для материалов с «идеальной» структурой данные должны лежать на кривой или даже выше. Величина отклонения конкретной экспериментальной точки от идеальной кривой должна количественно характеризовать как степень дефектности (неоднородности) структуры, так и работоспособность материала и изготовленных из него изделий [9-11]. Методика расчета интегральной оценки надежности приведена в работе [7]. В результате, зная механические свойства ( $\delta$  и  $\sigma_B$ ) конкретного материала, можно получить интегральную оценку  $f_c$  дефектности его структуры и/или работо-

способности, выраженную в долях единицы (1,0 соответствует условно бездефектной, т.е. максимально однородной структуре).

В проведенных ранее исследованиях установлено, что ОТМ присутствуют в любом поликристаллическом бериллии, причём характер микронапряжений таков, что каждое зерно оказывается сжатым вдоль гексагональной оси, т.е. ОТМ блокируют разрушение по плоскости базиса [6]. Как известно, разрушение по плоскости базиса является основным видом разрушения бериллия [2]. Вблизи вершины растущей трещины происходит быстрая релаксация ОТМ, и прочность материала в её окрестности падает до величин, характерных для монокристаллов. Этим объясняются трудности при создании усталостной трещины в бериллии, так как только зародившись, трещина катастрофически быстро распространяется через весь объём образца при докритических значениях напряжений. Разрушение при этом будет в основном внутризёрненным (по плоскостям базиса). Приведенные в работе [5] фрактограммы разрушенных образцов подтверждают такой вывод. Наиболее характерные фрактограммы для образцов горячепрессованного бериллия приведены на рис. 1. На основе анализа большого количества фрактограмм сделан вывод, что в области температур от азотной до комнатной разрушение происходит преимущественно сколом по плоскости базиса и в незначительной степени – по границам зерен. Межзёрненное разрушение наблюдается большей частью в мелких зернах. На рис. 1 показаны участки в начале (а), середине (б) и конце (в) трещины. Видно, что вклад разрушения по плоскости спайности возрастает по мере движения трещины (увеличения ее скорости) при одновременном уменьшении пластической деформации.

В работе [5] также отмечен большой разброс результатов измерений  $K_{IC}$  на образцах, вырезанных как из одной горячепрессованной заготовки (10...15%), так и образцов, изготовленных из различных заготовок одного сорта материала (20...30%).

Причиной большого разброса результатов измерений  $K_{IC}$  могут быть: поверхностные микротрещины, которые образуются в процессе механической вырезки образцов из блока и при создании надреза, ориентация вырезки образца относительно оси прессования блока, качество изготовления надреза и величина его радиуса, а также степень неоднородности структуры образцов.

Для устранения поверхностных микротрещин, которые возникали при механической вырезке образцов из блоков, проводилось удаление поверхностного слоя на глубину 0,3 мм химическим травлением. Затем в образцах создавался надрез радиусом 0,1 мм методом электроэрозионной резки. Следует учитывать, что электроэрозионная резка в зависимости от режима сама может создавать поверхностные микротрещины, по крайней мере, в пределах одного зерна [7]. Эти микротрещины в вершине надреза в дальнейшем вполне могут стать зародышами магистральной трещины. Исследования влияния параметров надреза на характеристики  $K_{IC}$  бериллия по-

казали, что большую роль в образовании микротрещин играют не только величина радиуса надреза и его длина, но и качество его изготовления [5]. Поэтому при создании надреза необходимо выбирать самый мягкий и одинаковый для всех образцов режим резки.

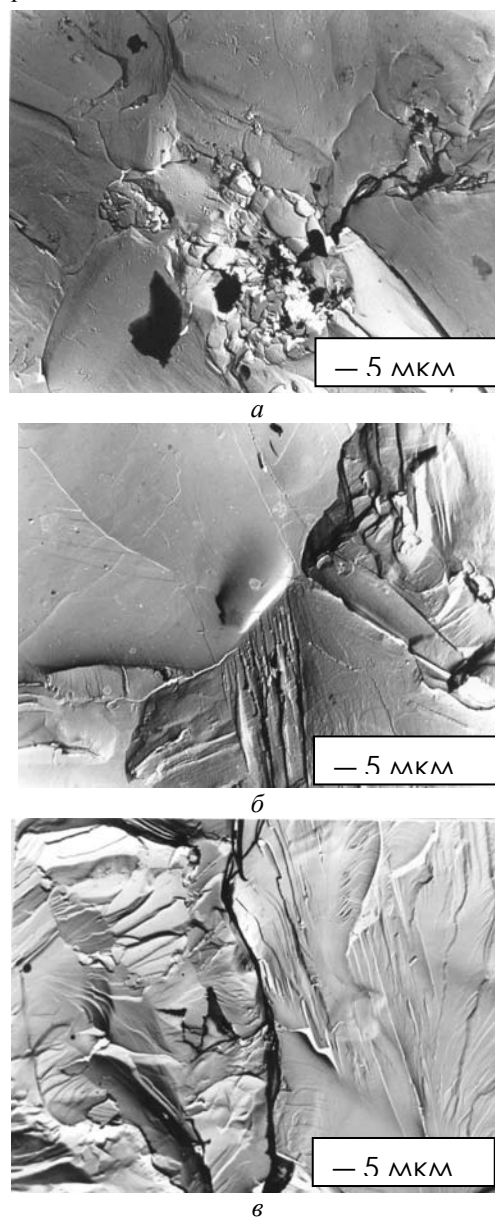


Рис. 1. Фрактограммы образца, испытанного на вязкость разрушения при комнатной температуре: а, б, в – начало, середина и конец трещины

На рис. 2 показаны поверхностные микротрещины в порошковом бериллии технической чистоты после электроэрозионной резки латунным проводом диаметром 0,2 мм.

Анализ экспериментальных результатов показал, что существенное влияние на абсолютные значения вязкости разрушения и их разброс оказывает структура материала, которая формируется в процессе горячего прессования. Эти особенности структуры в модели механических свойств описываются коэффициентом однородности  $f_c$ .

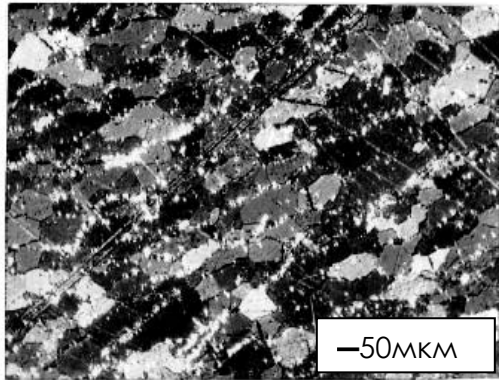


Рис. 2. Поверхностные микротрещины в бериллии технической чистоты после электроэрозионной резки

Для испытанных в работе [5] сортов горячепрессованного бериллия по методике [9] были рассчитаны значения коэффициента однородности структуры и сопоставлены с результатами измерения  $K_{1c}$  при комнатной температуре (рис. 3). Из рисунка можно видеть, что зависимость имеет экстремальный характер с максимумом при  $f_c = 0,8$ . К сожалению, из-за ограниченного количества и значительного разброса экспериментальных точек, можно дать лишь качественное объяснение приведенной зависимости.

Рассмотрим здесь два случая.

1. Весьма неоднородная структура ( $f_c < 0,5$ ). В этом случае имеются крупные включения оксида и интерметаллидов при большой дисперсии размеров зёрен, вблизи которых могут зарождаться микротрещины. Именно такая структура характерна для одной партии горячепрессованного технического бериллия с повышенным содержанием железа, который показал самые низкие значения вязкости разрушения по сравнению с образцами других партий этого сорта материала [5].

2. Однородная структура, когда значение  $f_c$  приближается к единице. В этом случае в материале отсутствуют элементы структуры (включения и/или конгломераты мелких зёрен), способные остановить или замедлить развитие трещины. Такую структуру по данным [5] имеет чистый металл литейного происхождения, не содержащий включений оксида, образцы которого показали при испытаниях значения вязкости разрушения в три раза меньше, чем у образцов порошкового металла.

Таким образом, зависимость  $K_{1c} - f_c$  должна иметь максимум при определенном (для исследуемого сорта материала) коэффициенте однородности структуры  $f_c$ , ниже и выше которого наблюдаются снижения значений вязкости разрушения бериллия.

ОТМ оказывают существенное влияние и на характеристики работоспособности бериллиевых материалов.

Стойкость к термоудару, а также малоцикловая термическая усталость являются определяющими характеристиками при использовании бериллия, например, в качестве защиты первой стенки термоядерного реактора ИТЭР [3].

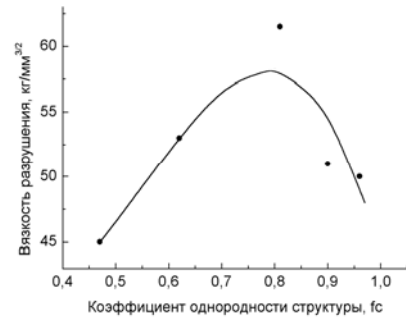


Рис. 3. Корреляция между коэффициентом однородности структуры  $f_c$  и вязкостью разрушения  $K_{1c}$  для различных сортов бериллия

Представляло интерес провести анализ экспериментальных результатов и установить взаимосвязь этих двух характеристик с коэффициентом однородности структуры  $f_c$ . Для этого были испытаны бериллиевые материалы с различными сочетаниями прочности и пластичности и получены термодинамические характеристики для максимального диапазона изменения  $f_c$ . Цилиндрические образцы ( $\varnothing 30 \times 30$  мм) вырезали механическим способом и подвергали химическому травлению поверхности на глубину 0,25 мм.

Работоспособность бериллия оценивалась по максимальной величине перепада температуры, не вызывающего разрушения (появления трещин) образца, и по количеству термических ударов до разрушения материала.

Термическое воздействие заключалось в нагревании цилиндрических образцов до определенной температуры (в интервале 200...650 °С) и последующем охлаждении в воде комнатной температуры.

Количество термических ударов до разрушения образца определялось в процессе испытаний бериллиевых образцов на малоцикловую термическую усталость.

Ранее для бериллия установлена устойчивая корреляция характеристик термической и малоцикловой термической усталости [12-13].

На рис. 4 для горячепрессованных сортов бериллия приведена зависимость значений термической и коэффициента однородности структуры. Из рисунка видно, что термическая усталость бериллия практически линейно увеличивается с ростом  $f_c$ .

То есть для горячепрессованного бериллия коэффициент однородности структуры  $f_c$  может характеризовать и работоспособность бериллия.

Для повышения работоспособности изделий из бериллия за счет увеличения степени однородности структуры (однородность химического состава, минимальный разброс размера зерен, соблюдение постоянства параметров исходных порошков и условий их получения) необходимо добиваться равномерного распределения оксида бериллия и вторичных фаз. В противном случае, с ростом характеристик работоспособности может наблюдаться снижение абсолютных значений вязкости разрушения материала.

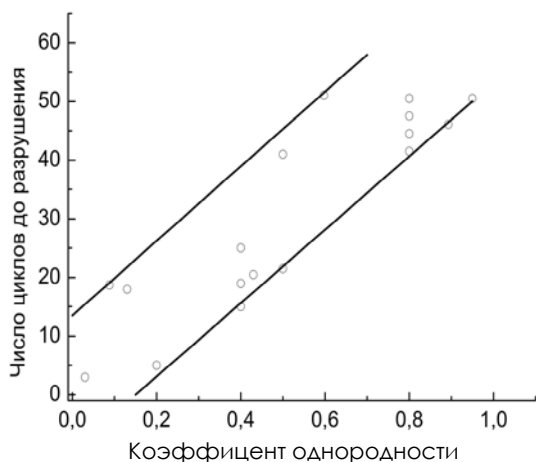


Рис. 4. Корреляция между термпрочностью и коэффициентом однородности структуры при испытаниях на малоцикловую термическую усталость (650...20 °С) для горячепрессованного бериллия

Влияние неоднородности химического состава по объему на механические характеристики горячепрессованного бериллия было установлено прямым экспериментом. В прессформу для прессования засыпали последовательно два порошка одинаковой крупности (А и Б, рис. 5), но различающиеся по содержанию примесей, и провели процесс горячего прессования. Механические испытания на растяжение проводились на образцах, вырезанных из полученной горячепрессованной заготовки в соответствии со схемой (см. рис. 5). В таблице приведены химические составы исходных порошков и результаты механических испытаний. Видно, что прочность образцов на границе раздела существенно ниже прочности гомогенных образцов, причем разрушение образцов типа А/Б всегда происходило по границе раздела.

Содержание примесей в исходных порошках (мас. %) и механические свойства заготовки для образцов типа А, Б и А/Б (см. рис. 5)

Образец	Fe	Si	Al	C	O <sub>2</sub>	Be	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta$ , %
А	0,05	0,011	0,004	0,07	0,9	98,7	410	317	2,2
Б	0,19	0,013	0,03	0,08	0,9	98,7	423	306	2,3
А/Б	-	-	-	-	-	-	338	330	0,8

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И.И. Папилов, Г.Ф. Тихинский. *Пластическая деформация бериллия*. М.: «Атомиздат», 1968, 452 с.
2. *Beryllium. Science and Technology*. v.1-2, ed. by D. Webster and G.I. London, Plenum Press, New York & London, 1979 / Сокр. русский перевод: *Бериллий. Наука и технология*. М.: «Металлургия», 1984, 624 с.
3. Р.-Н. Rebut. ITER: the first experimental fusion reactor// *Fusion Engineering and Design*. 1995, v. 30, p. 85-118.

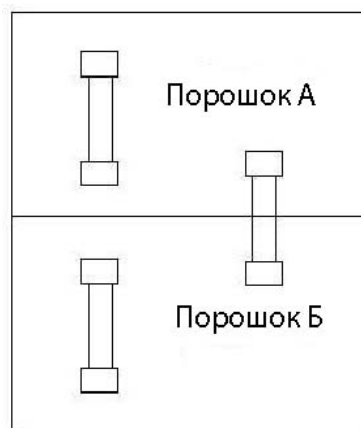


Рис. 5. Схема вырезки образцов из горячепрессованного блока

#### ВЫВОДЫ

1. Проанализированы имеющиеся к настоящему времени результаты измерения вязкости разрушения промышленных сортов бериллия при комнатной температуре. С позиций концепции ОТМ объяснен большой разброс экспериментальных результатов  $K_{Ic}$ .
2. Определены характеристики термпрочности и малоцикловой термической усталости горячепрессованных сортов бериллия технической чистоты. Показано, что для бериллия эти характеристики проявляют устойчивую корреляцию с коэффициентом однородности структуры.
3. Показано, что величина предложенного в концепции ОТМ коэффициента однородности структуры  $f_c$  является интегральной оценкой работоспособности изделий из бериллия и важным параметром, определяющим способность материала сопротивляться распространению в нем трещин.

4. Сб. трудов V рабочей группы Международного энергетического агентства по бериллию. *Перспективные материалы*: Специальный выпуск. М., 2002, 143 с.
5. П.И. Стоев. *Влияние структурных факторов на формирование механических, вязкостных, динамических свойств и акустическую эмиссию новых бериллиевых материалов*: Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. Харьков, 1999, 36 с.
6. А.М. Хомутов, В.С. Михайлов, П.Е. Куринский. Особенности структуры бериллия и их связь с работоспособностью поликристаллического ме-

- талла в различных условиях // *Металлы*. 2002, №1, с. 88-96.
7. Ю.В. Тузов, А.М. Хомутов. Разработка обобщающего критерия работоспособности изделий из бериллия // *Деформация и разрушение материалов*. 2010, №3, с. 76-88.
  8. Ю.В. Тузов, А.М. Хомутов. Механизмы релаксации остаточных термических микронапряжений в бериллии // *Цветные металлы*. 2009, №12, с. 14-20.
  9. Ю.В. Коновалов, Ю.В. Тузов, А.М. Хомутов. Разработка программного обеспечения для анализа влияния технологических факторов на конечные свойства заготовок из бериллия // *Химическая технология*. 2010, т. 11, №3, с. 175-181.
  10. В.А. Горохов, Я.Д. Пахомов, В.Н. Пронин, Ю.В. Тузов. Бериллий – материал ядерной и термоядерной техники // *ВАНТ. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2009, №2, с. 124-127.
  11. A.M. Khomutov, V.S. Mikhailov, and P.E. Kurinskii. Effect of Residual Thermal Microstresses on the Strength and Plasticity of Polycrystalline Beryllium // *Russian Metallurgy*. 2002, №1, p. 88-96.
  12. R.D. Watson, D.L. Youchison, D.E. Dombrowski, R.N. Guiniatulin, I.B. Kupriyanov. Low Cycle Thermal Fatigue Testing of Beryllium Grades for ITER PFC // *Proc. 2nd IEA Int. Workshop on Be Technology for Fusion, Sept. 6-8, 1995, Wyoming*, p. 7-38.
  13. M. Rodig, R. Duve, A. Gervash, A. Khomutov, J. Linke, A. Schuster. Thermal Shock Tests with Beryllium Coupons in the Electron Beam Facility JUDITH // *Proc. of the 2nd IEA Int. Workshop on Be Technology for Fusion*. Sept. 6-8, 1995, Wyoming, p. 39-57.

Статья поступила в редакцию 28.08.2011 г.

## **ВПЛИВ ЗАЛИШКОВИХ ТЕРМІЧНИХ НАПРУГ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ В'ЯЗКОСТІ РУЙНУВАННЯ І ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ГАРЯЧЕПРЕСОВАНОГО БЕРИЛІЮ**

*I.I. Папіров, П.І. Стоєв, А.А. Ніколаєнко, Ю.В. Тузов, А.М. Хомутов*

З позицій концепції залишкових термічних микронапружень (ЗТМ) проаналізовані наявні на сьогодні результати вимірювання в'язкості руйнування берилію  $K_{IC}$  при кімнатній температурі, а також пояснені труднощі, що виникають при створенні утомленої тріщини в берилію. Показано, що величина запропонованого в концепції ЗТМ коефіцієнта однорідності структури  $f_c$  є інтегральною оцінкою працездатності виробів з берилію і важливим параметром, що визначає здатність матеріалу чинити опір розповсюдженню в ньому тріщин.

## **INFLUENCE OF RESIDUAL THERMAL STRESS ON FEATURES FRACTURE TOUGHNESS AND PERFORMANCE HOT-PRESSED BERYLLIUM**

*I.I. Papirov, P.I. Stoev, A.A. Nikolaenko, Yu.V. Tuzov, A.M. Khomutov*

From the standpoint of the concept of residual thermal microstresses (RTM) analyzed the presently available measurements of fracture toughness  $K_{IC}$  of beryllium at room temperature, and also explained the difficulties in establishing a fatigue crack in beryllium. Shown that the value proposed in the concept of homogeneity of the structure factor RTM  $f_c$  is of integral evaluation of health products from beryllium, and an important parameter determining the ability of the material to resist the spread of cracks in it.