

УДК 669.725:621.039.532.5
DOI 10.17223/19988621/43/9

Ю.В. Тузов

К ВОПРОСУ О ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ БЕРИЛЛИЯ

На базе нового подхода к проблеме прочности и пластичности бериллия критически проанализированы опубликованные к настоящему времени данные по результатам измерения вязкости разрушения бериллия. Показано, что для бериллия неприемлемы существующие методы измерения вязкости разрушения, хорошо зарекомендовавшие себя на других металлах, и необходима разработка нового метода измерения вязкости разрушения, учитывающего природную специфику бериллия.

Ключевые слова: *бериллий, вязкость разрушения.*

Испытания бериллия на вязкость разрушения сопряжены с двумя трудностями. Во-первых, для этого необходимы крупногабаритные образцы сложной формы. Во-вторых, значительные трудности вызывает создание в таких образцах усталостной трещины. Для многих типов образцов из бериллия попытки ввести усталостную трещину так и не увенчались успехом из-за преждевременного разрушения. Хотя во многих работах отмечается, что наличие или отсутствие первоначальной трещины существенно не сказывается на результатах испытаний на вязкость разрушения бериллия, но тем не менее эта проблема требует дальнейшего детального анализа. Отметим, что зарубежные публикации на эту тему заканчиваются в конце 70-х годов.

В этой связи представляет интерес докторская диссертация П.И. Стоева [1], одна из глав которой целиком посвящена измерению вязкости разрушения K_{IC} различных отечественных сортов бериллия при различных температурах, а также сделан исчерпывающий аналитический обзор зарубежных публикаций. Один из основных выводов, относящийся к испытаниям при комнатной температуре, заключается в том, что величина K_{IC} не коррелирует ни с одним из обычных структурных факторов, таких, как размер зерна, содержание примесей (в том числе и BeO), термообработка и т.п. (по крайней мере, не обнаружена какая-либо простая взаимосвязь), т.е. полное понимание природы разрушения отсутствует. Использование бериллия в технике в основном ограничивается изделиями, несущими исключительно физические функции – отражения нейтронов (отражатели атомных реакторов), поглощения тепла (тормозные колодки самолетов, теплозащитные экраны ракет и космических аппаратов), размерной стабильности (гироскопы) и т.п. В то же время, использование бериллия в деталях нагруженных конструкций немислимо без предварительных расчетов предельного равновесия материала с трещинами и экспериментального определения его вязкости разрушения.

1. Необходимые сведения

В данной статье мы попытаемся проанализировать результаты работы [1] с позиций концепции остаточных термических микронапряжений (ОТМ). Сама концепция (более известная как модель механических свойств бериллия) подробно

изложена в работах [2–4], поэтому здесь кратко перечислим лишь основные её, доказанные экспериментально, следствия, необходимые для анализа.

1. Существует линейная зависимость между пределом прочности и величиной ОТМ, т.е. с ростом ОТМ возрастает предел прочности.

2. Величина ОТМ, в основном, зависит от возможности зернограницного проскальзывания, которая, в свою очередь, зависит от количества и степени дисперсности зернограницных включений оксида и интерметаллидов.

3. Коэффициент однородности структуры f_c – безразмерная величина, характеризующая степень отклонения значения механических свойств конкретного материала от некоторой «идеальной» кривой, построенной на базе модельных представлений и статистических данных. Величина f_c хорошо коррелирует с работоспособностью (в частности, с термпрочностью) изделий из бериллия.

2. Анализ результатов работы [1]

ОТМ присутствуют в любом поликристаллическом бериллии, причём характер их таков, что каждое зерно оказывается сжатым вдоль гексагональной оси, т.е. ОТМ блокируют разрушение по плоскости базиса. Как известно [5], разрушение по плоскости базиса является основным видом разрушения бериллия. Вблизи вершины растущей трещины происходит мгновенная релаксация ОТМ и прочность материала в её окрестностях падает до величин, характерных для монокристаллов. Этим и объясняются трудности при создании усталостной трещины в бериллии, так как, только зародившись, она катастрофически распространяется через весь объём образца при невысоких напряжениях. Разрушение при этом будет в основном внутризёрненным (по плоскостям базиса). Приведённые в [1] микрофрактограммы подтверждают такой вывод (см. рис. 1). Из рис. 1 видно, что при 20 °С разрушение происходит преимущественно сколом по плоскости базиса и в меньшей степени по границам зерен. Межзёрненное разрушение наблюдается большей частью в случае мелких зерен. Рис. 1, *а, б, в* относятся соответственно к участкам в начале, середине и конце трещины. Видно, что вклад разрушения по плоскости спайности возрастает по мере движения трещины (увеличения ее скорости) при одновременном уменьшении пластической деформации. К сожалению, в [1] не проводилось измерение ОТМ рентгеновским методом, поэтому вышеприведённые рассуждения носят лишь качественный характер.

В [1] отмечен большой разброс результатов измерений K_{IC} на образцах, вырезанных из одной горячепрессованной заготовки. Возможно, это объясняется тем, что образцы сначала травились в кислоте на глубину 0,3 мм для снятия повреждённого при вырезке поверхностного слоя, а после этого в них создавался надрез методом электроэрозионной резки. В то же время, электроэрозионная резка, в зависимости от режима, сама может создавать поверхностные микротрещины, по крайней мере, в пределах одного зерна [5]. Эти микротрещины в вершине надреза в дальнейшем вполне могли стать зародышами магистральной трещины. На рис. 2 показаны поверхностные микротрещины в бериллии сорта Т-56 после резки по стандартному режиму. Безусловно, для создания надреза надо было выбирать самый мягкий и фиксированный режим резки, а травление проводить в последнюю очередь.

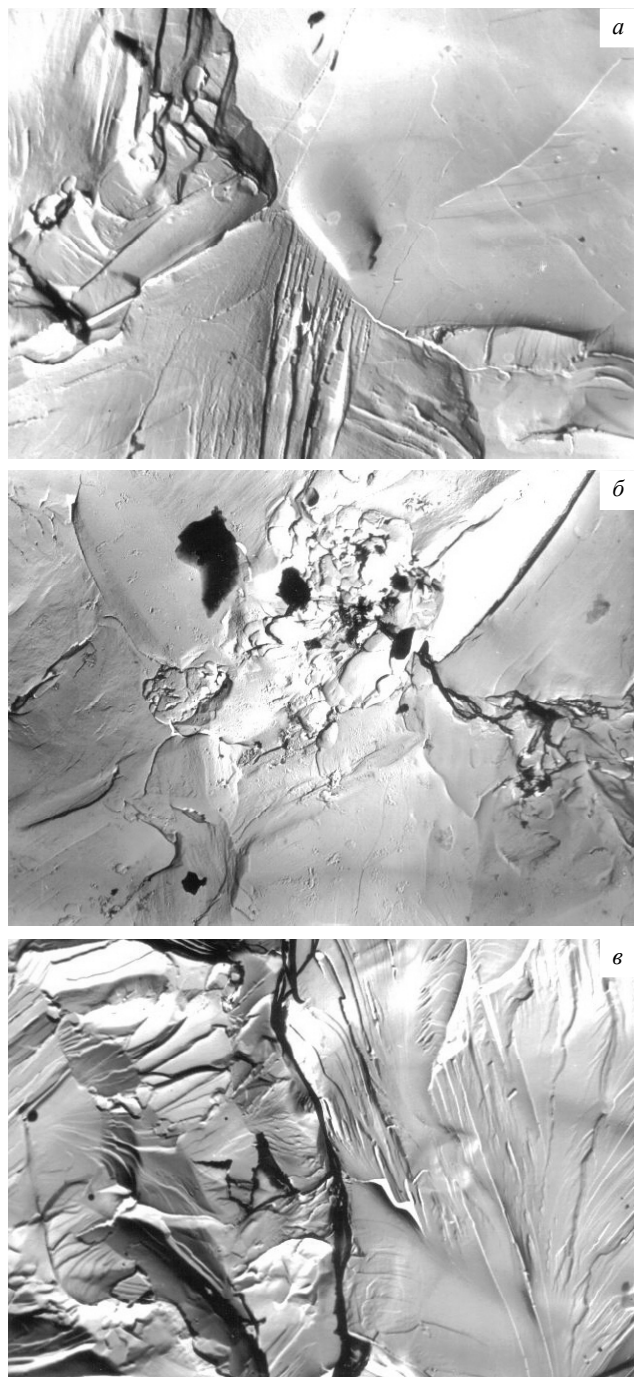


Рис. 1. Микрофрактограммы образца, испытанного на вязкость разрушения при комнатной температуре. Увеличение $\times 5000$
Fig. 1. The sample tested for fracture toughness microfractogramme. Magnification $\times 5000$

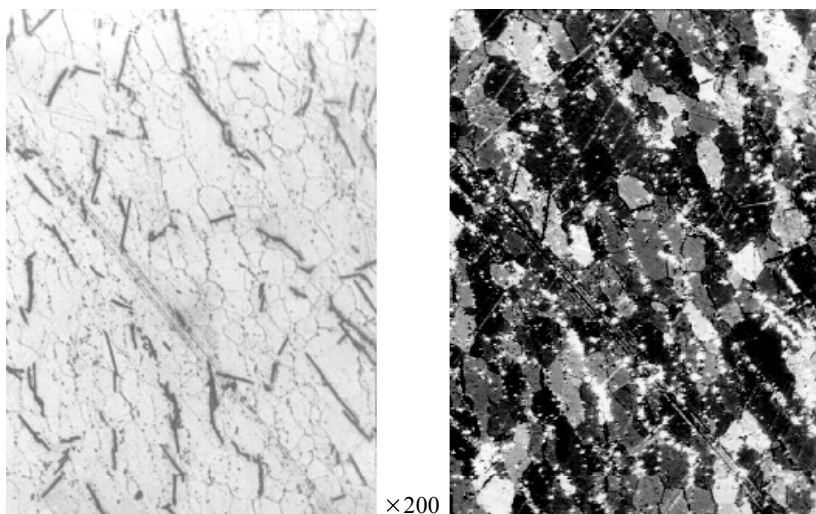


Рис. 2. Поверхностные трещины в бериллии сорта Т-56 после электроэрозионной резки
Fig. 2. The beryllium T-56 surface cracks after EDM cutting

Ещё один аспект, который просто невозможно было учесть в [1], заключается в том, что коэффициент однородности структуры f_c , безусловно влияющий на работоспособность изделий из бериллия [3], может оказаться полезным при анализе факторов, влияющих на величину K_{IC} . Для использованных в [1] сортов горяче-прессованного бериллия, по методике, изложенной в [6], были рассчитаны значения коэффициента однородности и сопоставлены с результатами измерения K_{IC} при комнатной температуре (см. рис. 3). Можно видеть, что зависимость имеет экстремальный характер с максимумом при $f_c = 0.8$. Попытка математической интерпретации полученных результатов приводит к сложной зависимости:

$$Y = -430.3x^3 + 742.4x^2 - 368.1x + 98.28.$$

К сожалению, из-за ограниченного количества и значительного разброса экспериментальных точек можно дать лишь качественное объяснение приведённой зависимости. Рассмотрим два крайних случая:

- весьма неоднородная структура ($f_c < 0.5$) содержит крупные включения оксида и интерметаллидов при большой дисперсии размеров зёрен, которые сами могут быть источниками трещин. Именно такая структура характерна для материала сорта Т-56.

- однородная структура, когда значение f_c приближается к единице. В этом случае в материале отсутствуют элементы структуры (включения нужного размера и/или конгломераты мелких зёрен), способные остановить или замедлить развитие трещины. Косвенно этот вывод подтверждается тем, что по данным [1] чистый металл литейного происхождения, не содержащий включений оксида, обладает втрое меньшей вязкостью разрушения по сравнению с порошковым металлом.

Таким образом, налицо необходимость в определённом компромиссе, а именно: при попытках максимально повысить работоспособность изделий из бериллия за счёт увеличения однородности структуры неизбежно происходит некоторое снижение вязкости разрушения. Разумеется, в силу отмеченных выше обстоятельств, этот вывод следует рассматривать как предварительный.

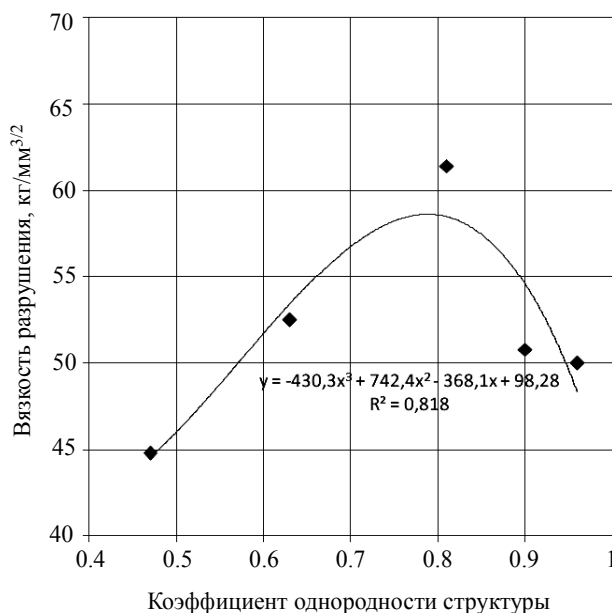


Рис. 3. Корреляция между f_c и вязкостью разрушения для отечественных сортов бериллия по данным [1]

Fig. 3. f_c and fracture toughness correlation

Заключение

Данную статью следует рассматривать как попытку объяснить имеющиеся к настоящему времени результаты измерения вязкости разрушения бериллия при комнатной температуре, основываясь на современных представлениях о прочности и пластичности бериллия.

С позиций концепции ОТМ объяснены трудности, возникающие при создании усталостной трещины в бериллии. К сожалению это обусловлено самой природой бериллия, и поэтому, применительно к бериллию, необходимо разработать новую методику измерения K_{IC} , учитывающую его специфические особенности.

Показано, что причиной большого разброса результатов измерений K_{IC} могут быть поверхностные микротрещины, образующиеся при создании надреза, а также возможное сложное и неоднозначное влияние однородности структуры исследованных образцов.

Решение указанных задач может потребовать не меньших усилий, чем те, которые были в свое время затрачены на исследование возможностей улучшения пластических характеристик бериллия. Даже из ограниченного количества имеющихся данных можно заключить, что пути повышения пластичности и вязкости бериллия могут оказаться различными. Если дальнейшие исследования подтвердят это, то понадобится повторить многое из того, что было сделано ранее при изучении пластичности бериллия, для выяснения возможностей повышения его вязкости. Из-за больших размеров и сложной конфигурации образцов и существующей в настоящее время неопределённости в методике испытаний решение этой задачи, несомненно, вызывает значительные трудности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Стоев П.И.* Влияние структурных факторов на формирование механических, вязкостных, динамических свойств и акустическую эмиссию новых бериллиевых материалов: дис. докт. физ.-мат. наук. Харьков: ХФТИ, 1999. 445 с.
2. *Хомутов А.М., Михайлов В.С., Куринский П.Е.* Особенности структуры бериллия и их связь с работоспособностью поликристаллического металла в различных условиях // *Металлы*. 2002. № 1. С. 88–96.
3. *Тузов Ю.В., Хомутов А.М.* Разработка обобщающего критерия работоспособности изделий из бериллия // *Деформация и разрушение материалов*. 2010. № 3.
4. *Тузов Ю.В., Хомутов А.М.* Механизмы релаксации остаточных термических микронапряжений в бериллии // *Цветные металлы*. 2009. № 12.
5. *Beryllium. Science and Technology. V.1–2* / ed. by D. Webster and G.I. London. New York & London: Plenum Press, 1979. Сокр. русский перевод: Бериллий. Наука и технология. М.: Металлургия, 1984. 624 с.
6. *Коновалов Ю.В., Тузов Ю.В., Хомутов А.М.* Разработка программного обеспечения для анализа влияния технологических факторов на конечные свойства заготовок из бериллия // *Химическая технология*. 2010. Т. 11. № 3. С. 175–180

Статья поступила 05.05.2016 г.

Tuzov Yu.V. THE ISSUE OF FRACTURE TOUGHNESS OF BERYLLIUM. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 5(43). pp. 83–89

DOI 10.17223/19988621/43/9

There are residual thermal stresses (RTS) in any polycrystalline beryllium. The destruction of the plane of the basis was blocked by the RTS. The stress relaxation was in a top of the growing cracks and the strength of material reduced.

It is difficult for the establishing a fatigue crack. The dimensionless deviation of the mechanical properties from ideal (model) named the uniformity coefficient of the structure. The calculated coefficient uniformity and fracture toughness for the hot pressed beryllium was compared. The maximum ($f_c = 0.8$) is on the dependence.

Large inclusions and dispersions of grain size exist at heterogeneous structure ($f_c < 0.5$) such as T-56 material. There are not elements that can stop the developing of cracks in homogeneous structure ($f_c = 1$). It is the casting beryllium.

The increasing homogeneity of the structure for improving efficiency of articles of beryllium leads to reduction of fracture toughness.

Keywords: beryllium, fracture toughness.

TUZOV Yuriy Valentinovich (Candidate of Technical Sciences, National Research Nuclear University MEPhI, Russia)

REFERENCES

1. Stoev P.I. (1999) Vliyanie strukturnykh faktorov na formirovanie mekhanicheskikh, vyazkostnykh, dinamicheskikh svoystv i akusticheskuyu emissiyu novykh berillievyykh materialov [Influence of structural factors on the mechanical, viscosity, dynamic properties and acoustic emission of new beryllium materials]. Phys. and Math. Dr. Diss. Kharkov: KhPTI. 445 p.
2. Khomutov A.M., Mikhailov V.S., Kurinskiy P.E. (2002) Osobennosti struktury berilliya i ih svyaz s rabotosposobnostyu polycrystallicheskogo metalla v razlichnykh usloviyakh [The relationship the performance of polycrystalline metall with features of the structure of beryllium under different conditions]. *Journal Metals*. 1. pp. 88–96.
3. Tuzov Yu.V., Khomutov A.M. (2010) Razrabotka obobschayushchego kriteriya rabotospocobnosti berilliy [The workable criteria for beryllium summarizing the development]. *Razrushenie materialov – Journal the Materials Deformation and Fracture*. 3. pp. 34–42.

4. Tuzov Yu.V., Khomutov A.M. (2009) Mekhanizmy relaksatsii termicheskikh ostatочnykh napryazheniy [The relaxation of residual thermal stresses mechanisms]. *Tsvetnye metally – Journal Non-ferrous Metals*. 12. pp. 15–23.
5. Beryllium. Science and Technology v.1–2, ed. by D. Webster and G.I. London (1979) New York & London: Plenum Press.
6. Konovalov Yu.V., Tuzov Yu.V., Khomutov A.M. (2010) Razrabotka programmnoy obespecheniya dlya analiza vliyaniya tekhnologicheskikh faktorov na konechnye svoystva zagotvok iz berilliya [Software development for analyzing the influence of technological factors on the final properties of workpieces made of beryllium]. *Khimicheskaya tekhnologiya – Journal Chemical Technology*. 11(3) pp.175–180.