

Изучение вязкости разрушения бериллия. Часть 1

Стоев П.И.[†], Папиоров П.П., Николаенко А.А.

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
ул. Академическая 1, 61108 Харьков, Украина

[†] stoev@kipt.kharkov.ua

Investigation fracture toughness on Beryllium. Part 1

P.I. Stoev, I.I. Papirov, A.A. Nikolaenko

National Science Center "Kharkov Institute of Physics & Technology", Akademicheskya St. 1, 61108 Kharkov, Ukraine

В работе изучена зависимость вязкости разрушения различных сортов бериллия от чистоты, размера зерна, и режимов термообработки. Установлено, что на характеристики вязкости разрушения бериллия существенно влияют структурные факторы материала, а абсолютные значения заметно меняется от партии к партии и сложным образом зависит от температуры. Проведены исследования сколов в различных зонах разрушения образцов бериллия. Высказано предположение о наличии двух механизмов сопротивления распространению трещин в бериллии – деформационного (преобладающего при $T > 473\text{K}$) и примесного (связанного с выделением вторичных фаз и преобладающего при температурах ниже 473K).

Ключевые слова: бериллий, вязкость разрушения, размер зерна, чистота, термообработка.

1. Введение

Бериллий обладает уникальным сочетанием физико-механических свойств. Он имеет высокие электро- и теплопроводность, жаростойкость, температуры плавления и кипения, коррозионную стойкость и размерную стабильность. По удельным значениям жесткости, прочности и теплоемкости он превосходит все другие металлы, по плотности сравним с самыми легкими магниевыми сплавами. Совокупность этих качеств делает бериллий весьма перспективным конструкционным материалом для атомной и аэрокосмической техники, приборостроения, навигационной гироскопии, даже несмотря на ряд его недостатков, таких как хладноломкость, токсичность и высокая стоимость [1]. Конструкции из бериллия должны работать в крайне жестких условиях: под нагрузкой, при больших градиентах температур, в условиях термоциклирования и нейтронного облучения. Поэтому использование бериллия немыслимо без предварительных расчетов предельного равновесия материала с трещинами и экспериментального определения его вязкости разрушения.

Анализ имеющихся экспериментальных данных по-

Dependence of fracture toughness of various grades of beryllium from purity, grain size, and heat treatment regimes was in-process studied. It was installed that characteristics of fracture toughness of beryllium are influenced considerably by a material structure factor, and an absolute values considerably changes from party to party and shows complicated dependence from temperature. Cleavage surface in various zones of destruction of specimen of beryllium was investigated by electron microscope. It was suggested that have worked the two mechanisms of resistance to extending of cracks in beryllium - mechanism of deformation (predominating at $>473\text{K}$) and mechanism of impurity (connected with allocation of secondary phases and predominating at temperatures more low 473K).

Keywords: beryllium, fracture toughness, a grain size, purity, heat treatment

казывает, что вязкость разрушения бериллия изучена недостаточно, а полученные данные неоднозначны. До настоящего времени точно не определены взаимосвязи между величиной K_{Ic} и такими структурными факторами как размеры зерён, содержание примесей (в том числе и BeO) и т.п. Столь же неоднозначны сведения о влиянии на характеристики вязкости разрушения бериллия температуры и режимов термообработки.

Поэтому целью данной работы является изучение зависимости вязкости разрушения горячепрессованного бериллия от способа получения, величины зерна, содержания примесей, влияние температуры и параметров термообработки.

2. Материал и методика

В работе изучали свойства поликристаллического технического (Т) и дистиллированного (Д) горячепрессованного бериллия, полученного из порошка крупностью -56 и 20 мкм (Т20, Д20 и Т56), структура которых представлена в работе [2]. Для обеспечения при испытаниях на вязкость разрушения условий плоской деформации,

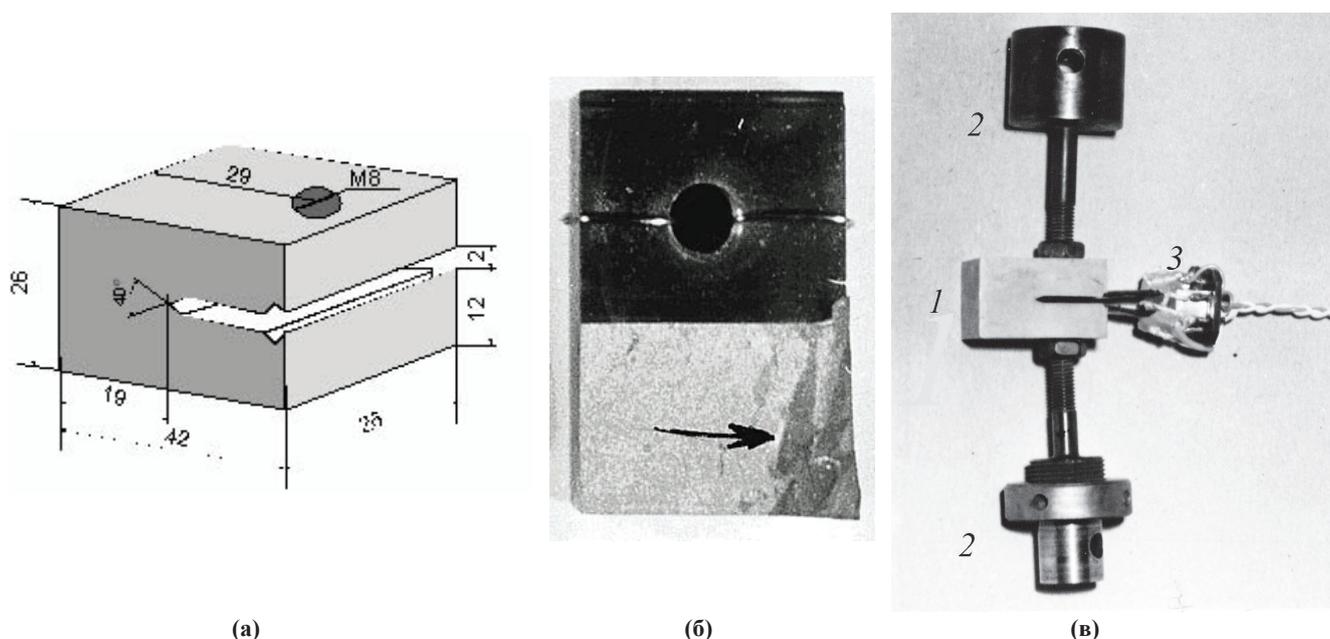


Рис. 1. Форма, размеры образца типа WOL (а), внешний вид разрушенного образца (б), вид образца (1) с захватами (2) и датчиком раскрытия трещины (3)(в).

были выбраны получившие широкое распространение в практике зарубежных исследований образцы для внецентренного растяжения типа WOL.

На рис.1 приведена форма и размеры образца типа WOL для определения вязкости разрушения, внешний вид разрушенного образца, вид образца с растягивающими захватами и датчиком раскрытия трещины.

Использование таких образцов позволяет производить прямое сравнение результатов испытаний зарубежного и отечественного металла.

Заготовки образцов для испытаний на вязкость разрушения (шириной 26 мм, длиной 42 мм и высотой 26 мм) вырезали из блоков материала механическим путем. В заготовках сверлили отверстия под резьбу и проводили химическое травление в водном растворе смеси азотной и плавиковой кислот для снятия, поврежденного механической резкой, слоя толщиной до 0,3-0,35 мм. Затем нарезали резьбу М8 для крепления захватов разрывной машины к образцу и с помощью электроискровой резки делали надрезы. Радиус в вершине надреза у образцов составлял 0,2 мм, длина надреза 11 мм.

Все испытания на вязкость разрушения проводились на универсальной испытательной машине 1958 У10-1, которая оборудована тензометрическим силоизмерительным приспособлением и устройством, регистрирующим перемещение захватов. Чувствительность машины по нагрузке при шкале 1000 кг составляла 5 кг. Испытания проводились в интервале температур 77 – 573 К. В качестве охлаждающих сред использовали жидкий азот и бензин. Нагрев образцов осуществляли в печи сопротивления. Образцы испытывали со скоростью растяжения 0,2 мм/мин. Диаграмму деформации записывали в координатах «нагрузка-перемещение захватов».

3. Результаты

В табл.1. приведены численные значения вязкости разрушения исследуемых горячепрессованных сортов

бериллия, измеренные при комнатной температуре. Указан размер зерна, содержание бериллия и оксида бериллия.

Данные табл.1(І) показывают, что среднестатистические значения вязкости разрушения существенно меняются от партии к партии в пределах одного и того же сорта металла. Анализ работ зарубежных авторов также показывает значительный разброс экспериментальных значений K_{Ic} бериллия измеренных при комнатной температуре. Так, например, у горячепрессованного бериллия сорта S-200 интервал измеренных значений K_{Ic} при 293 К составляет от 14 до 85 кг/мм^{3/2}. Авторы работы [3] связывают этот разброс в меньшей степени с особенностями структуры и свойств исследованного металла и считают, что он связан с отличиями в форме, приготовлении образцов и условиями испытаний.

Исследования зависимости вязкостных характеристик бериллия от структурных факторов

Структурные факторы существенным образом влияют на пластические и прочностные свойства бериллия [4]. Поэтому представляло интерес изучить взаимосвязь структурных характеристик и вязкости разрушения.

Рассмотрим результаты проведенных исследований влияния чистоты металла, содержания примесей и размера зерна на вязкость разрушения бериллия.

Таблица 1

Значения K_{Ic} (при 293 К), размер зерна, чистота и содержание окиси бериллия для различных сортов горячепрессованного бериллия

Сорт бериллия	K_{Ic} , кг/мм ^{3/2}	d, мкм	Be, %	BeO, %
	I	II	III	IV
T56	40-63,8	21-24	98,64	1,71
T20	53-60,5	20-21	98,48	1,95
Д20	42-47,5	14-15	99,03	1,07

Чистота

Из табл.1 видно, что уровень значений вязкости разрушения бериллия при комнатной температуре выше у технических сортов (Т56, Т20) по сравнению с дистиллированным металлом (Д20). Однако, разброс измеряемых значений K_{Ic} у чистых материалов ниже, чем у технических на 5-7%. Возможно, однако, что более высокая стабильность измеряемых значений K_{Ic} , вызвана не количеством примесей, а более стабильным фракционным составом материалов сорта Д.

Концентрация и распределение частиц оксида бериллия существенно влияют на механические свойства. Анализ экспериментальных данных позволил установить тенденцию уменьшения абсолютных значений вязкости разрушения с увеличением содержания ВеО. Эта тенденция проявляется при всех температурах испытания.

Отсутствие существенного влияния суммарной концентрации оксида бериллия на вязкостные свойства связано, вероятно, с тем, что при распространении трещины определяющим становится не общее содержание примесей, а специфический характер их распределения, который полностью формируется уже на стадии компактирования материала.

Размер зерна

Трудность интерпретации влияния размера зерна на вязкость разрушения вызвана прежде всего тем, что чистота и структура материала тесно связаны между собой. Это приводит к тому, что на характер зависимости K_{Ic} от размера зерна сильное влияние оказывает содержание примесей. Так, например, вязкость разрушения технического бериллия сорта Т20 чистотой ~98,48% (~1.95% по ВеО) на 15-20% выше значений K_{Ic} дистиллированного материала Д20 чистотой ~99.03% (~1.07% ВеО). Однако, эти материалы различаются по размеру зерна (20-21 и 14-15 мкм соответственно).

К сожалению, из-за особенностей порошковой технологии очень трудно получить материал с различной величиной зерна, но с постоянным содержанием оксида так, чтобы эти два эффекта можно было разделить. То есть возможности изучения влияния размера зерна на K_{Ic} в чистом виде крайне ограничены.

Материалы, которые изучали в данной работе, имели небольшое различие в размерах зерна (от 14 до 25 мкм) и его не удалось существенно изменить различными термообработками. Тем не менее, сравнение значений вязкости разрушения одинаковых сортов (технического и дистиллированного) материала, спрессованного из порошков с размером частиц -56 и 20 мкм показало, что материал из крупнозернистого порошка обладает более высокими значениями K_{Ic} (соответственно 63,8 и 60,5 кг/мм^{3/2} у сорта Т56 и Т20 и 47,5 кг/мм^{3/2} у дистиллированного Д20).

Влияние термической обработки

Термическая обработка является наиболее распространенным методом улучшения механических свойств металлов и сплавов. С ее помощью можно обеспечить снятие напряжений [5], возврат, рекристаллизацию [6], рост зерен, выделение фаз, растворение выделений, спекание и многие другие процессы. В случае бериллия обычно речь идет о малом количестве примесей металлов

до 0,2 % (ат.), но вследствие низкой растворимости других металлов в решетке бериллия даже малые их количества могут вызвать значительные эффекты, такие как упрочнение матрицы и образование выделений. Снятие напряжений происходит при температуре около 773 К, тогда как для растворения и выделения примесей необходимы более высокие температуры (соответственно 1073 и 848 - 873 К).

Образцы подвергали следующим термообработкам:

- отжиг при температуре 1023 К в течение 2 часа;
- старение при 823 К- 48 часов;
- старение при 923 К -50 часов;
- закалка от температуры 1323К;
- закалка от температуры 1373 К и старение при 923 К - 50 часов;
- закалка от 1373 К и старение 923 К -57 часов;
- закалка от 1373 К и старение 923 К -68 часов.

При выборе условий термообработки учитывали полученные ранее данные о влиянии отжига на ряд физико-механических характеристик бериллия при комнатных и повышенных температурах. Так отжиг при 1023 К обычно благоприятно сказывается на пластических характеристиках бериллия при 293К и несколько снижает температуру хрупко-пластичного перехода. Старение способствует заметному рафинированию матрицы и приводит к увеличению плотности выделений вторичных фаз, а закалка упрочняет матрицу.

Для сортов Т20 и Т56 обработки на твердый раствор (нагрев до 1323 К в течение 30 минут с последующей закалкой) не оказывают влияния на результаты испытаний. Старение при 923 К в течение 60 часов сопровождается некоторым (~10%) снижением вязкости разрушения.

Сорта материала Т20, Т56 и Д20 были также подвергнуты трем видам термообработки: старению при 923 К в течение 50 часов; закалке от температуры 1373 К; закалке от температуры 1373 К с последующим старением при 923 К в течение 50 часов. Из перечисленных термообработок лишь первая приводит к небольшому положительному эффекту, который заключается в небольшом повышении величины K_{Ic} сорта Т20 или сужении области разброса значений K_{Ic} сортов Д20 и Т56.

Закалка несколько расширяет область разброса результатов у материала Т56, а последующее старение закаленных образцов возвращает свойства на первоначальный уровень.

Таким образом, анализ всех экспериментальных результатов свидетельствует о крайне слабом влиянии термообработки на величину вязкости разрушения бериллия. Слабая зависимость K_{Ic} от термообработки подтверждает наше предположение о преобладающем влиянии на K_{Ic} характера распределения частиц окиси бериллия, который формируется на стадии компактирования материала и слабо меняется при указанных термообработках.

Влияние температуры испытания

Температурная зависимость вязкости разрушения трех исследованных сортов бериллия представлена на рис.2. Видно, что вязкость разрушения бериллия возрастает с температурой и характер температурной зависимости вязкости разрушения различных сортов бериллия

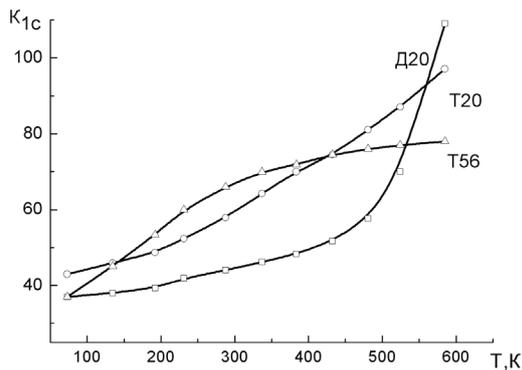


Рис. 2. Температурная зависимость вязкости разрушения исследованных сортов бериллия.

имеет специфические особенности. Величина коэффициента интенсивности напряжений в интервале температур от 77 до 473 К возрастает в 1,5 -2 раза. При высоких температурах (более 573 К) результаты измерений становятся некорректными. Это связано с тем, что в этих условиях трещина распространяется не в плоскости надреза, а в двух направлениях наклонных к первоначальной под углом 60°. Как известно, при движении трещины в направлении, которое отличается от направления первоначальной трещины, не выполняются все условия, принятые при анализе механики разрушения, и поэтому полученные результаты нельзя считать однозначными.

При комнатной температуре максимальную вязкость разрушения имеют образцы бериллия Т56 (63,8 кг/мм^{3/2}), минимальную Д20 (47,5 кг/мм^{3/2}). Температурная зависимость вязкости разрушения оказывается сложной: с понижением температуры ниже комнатной вязкость разрушения бериллия Т56 быстро падает а при 77 К становится сравнимой с вязкостью разрушения металла сорта Д20; при повышении температуры, наоборот, вязкость слабо возрастает и при температуре выше 473 К ее значения ниже, чем у других исследованных сортов бериллия. Металл сорта Д20 характеризуется самым большим разбросом измеряемых значений и самыми низкими величинами вязкости разрушения вплоть до температуры 473 К. При высоких температурах у этого сорта металла величина вязкости, наоборот, достигает самых высоких значений, однако, из-за значительной пластической деформации полученные величины нельзя рассматривать, как истинные значения вязкости разрушения. Вязкость разрушения бериллия сорта Т20 возрастает с температурой почти линейно.

Другой интересный эффект заключается в том, что последовательность увеличения вязкости разрушения не сохраняется постоянной при всех температурах (см.

рис.2). Например, при низких температурах (77 и 173 К) бериллий сорта Д20 обладает минимальной вязкостью разрушения, а в области температур 553-573 К эта партия материала имеет наибольшее значение вязкости разрушения среди исследуемых материалов. Наоборот, бериллий сорта Т56 при низких температурах (выше 150 К) входит в число материалов с максимальной вязкостью, а высоких температурах имеет минимальное значение K_{1c} .

Такое поведение K_{1c} существенно отличается от характера температурных зависимостей пластических характеристик бериллия, которые, как правило, для разных сортов металла изменяются эквивалентно исходной пластичности.

Литература

1. I.I.Papirov, Beryllium – structural material. Moscow, Mashinostroenie (1977) 158 p. (in Russian) [И.И.Папиров. Бериллий - конструкционный материал. М: «Машиностроение», 1977, 158 с.]
2. L.A.Kornienko, A.A.Nikolaenko, I.I.Papirov, P.I.Stoev, Y.V.Tuzov, A.M.Homutov. Atlas structures of Beryllium. Dubna (2009) 210 p. (in Russian) [Л.А.Корниенко, А.А.Николаенко, И.И.Папиров, П.И.Стоев, Ю.В.Тузоз, А.М.Хомутов Атлас структур бериллия, Дубна, 2009– 210 с.]
3. R.E. Cooper Fracture Mechanics Properties Beryllium In: Beryllium Science and Technology. New York and London Plenum Press, (1979), 351p.
4. I.I.Papirov. Plastic deformation of Beryllium. Moscow, Atomizdat (1973), 304 p. (in Russian) [И.И.Папиров. Пластическая деформация бериллия. М:Атомиздат, 1973– 304 с.]
5. I.I.Papirov, P.I.Stoev, A.A.Nikolaenko, Y.V.Tuzov, A.M.Homutov. Influence of the residual thermal stress on characteristics of fracture toughness and working capacity hot-pressing beryllium, VANT, 6 (76), 37 (2011) (in Russian) [И.И.Папиров, П.И.Стоев, А.А.Николаенко, Ю.В.Тузоз, А.М.Хомутов. Влияние остаточных термических напряжений на характеристики вязкости разрушения и работоспособность горячепрессованного бериллия, ВАНТ, 6 (76), 37 (2011)].
6. Y.V.Tuzov, A.M.Homutov, A.A.Nikolaenko, I.I.Papirov, P.I.Stoev Kinetics of recrystallization of the beryllium strained in the various ways. Chemical engineering, 10 (8), 460 (2009) (in Russian) [Ю.В.Тузоз, А.М.Хомутов, А.А.Николаенко, И.И.Папиров, П.И.Стоев. Кинетика рекристаллизации бериллия, деформированного различными способами. Химическая технология, 10 (8), 460 (2009)].