

Изучение вязкости разрушения бериллия. Часть 2

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

[†]stoev@kipt.kharkov.ua

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина

Investigation on Beryllium fracture toughness. Part 2

P. Stoev, I. Papirov, A. Nikolaenko

National Science Center "Kharkov Institute of Physics & Technology", Kharkov, Ukraine

Во второй части работы приведены результаты исследований структуры изломов в различных зонах разрушения образцов бериллия, которые испытывали для определения вязкости разрушения материала. В первой части работы были представлены результаты исследований влияния различных структурных факторов и термообработок на вязкость разрушения различных сортов горячепрессованного бериллия.

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

In the second part of work, researches result of structure of rupture in various zones of destruction of samples of beryllium which tested for definition of fracture toughness of a material are described. In the first part of work results of researches of agency of a various structure factor and heat treatments on fracture toughness of various quality hot-pressed beryllium have been presented.

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

1. Изучение структуры изломов

Значительный вклад в понимание процессов, протекающих при разрушении бериллия вносит фрактографическое изучение поверхности образовавшихся трещин. В настоящей работе использовали стандартную двухсту-

пенчатую методику препарирования реплик с оттенением платиной. Реплики просматривали в электронном микроскопе Tesla BS613 при увеличении до 6000.

Таблица 1.

Характер разрушения образцов бериллия.

Партия	T _{исп} , 0С	Состояние	d _{BeO} , Мкм	Распределение BeO	Доля разрушения по зернам		
					Начало	Середина	Конец
2 (Т20)	-196	Исх	0,2-0,3	р	85	80	75
	20	Исх	0,2-0,3	р	90	90	95
	20	закалка	0,5	н, к	40	50	50
	20	зак+старение	0,5	н	85	80	85
3Т(56)	-196	Исх	0,1-0,2	р	70	75	70
	20	Исх	0,1-0,2	р	70	75	70
	200	Исх	0,1-0,2	р	75	85	70
	20	закалка	> 0,2	н, к	45	50	50
1(Д20)	20	Исх	0,5	н	50	50	30
6	-196	Исх			90	90	95
	20	Исх			90	-	85
7	-196	Исх			100	100	100
	20	Исх			95	95	95
8	-196	Исх	0,1-0,2	р	95	90	95

Обозначения: р - равномерное, н - неравномерное распределение окиси, к - конгломераты частиц BeO или интерметаллидов.

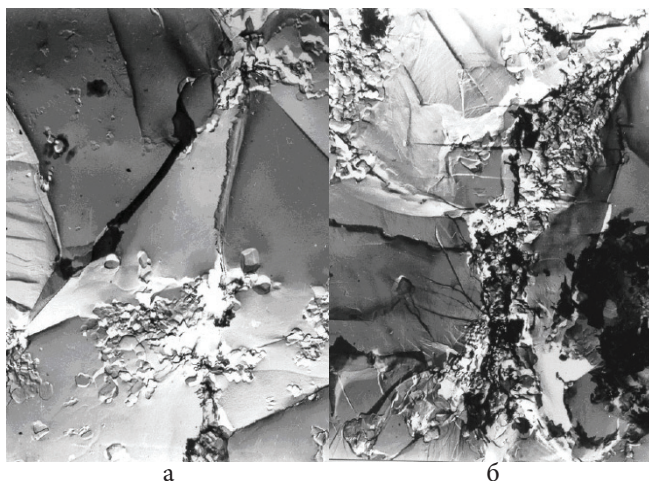


Рис.1. Фрактограмма разрушенного образца бериллия партии Д20 при: а–293 К; б–473 К.

Для выяснения природы и особенностей разрушения разных сортов металла проведены исследования сколов в различных зонах разрушения.

Приведенные результаты сведены в табл.1 и рассмотрены ниже.

Разрушение образцов партий Д20 при 293 К носит преобладающий межкристаллитный характер (рис.1). Доля межзеренного разрушения уменьшается вдоль длины трещины (табл.1). При температуре 473 К характер разрушения принципиально не меняется; усиливается лишь тенденция к разрушению по границам. Для закаленных образцов характерно неравномерное распределение окиси, а доля транскристаллитного разрушения меняется слабо.

Разрушение образцов партии Т20 носит преобладающий транскристаллитный характер (табл.1, рис. 2). Крупные зерна разрушаются по базисной плоскости (рис. 2а). Характер разрушения вдоль длины трещины меняется мало, однако увеличивается доля транскристаллитного разрушения в первой зоне. В области сильно развитого рельефа в средней части образцов наблюдается следы

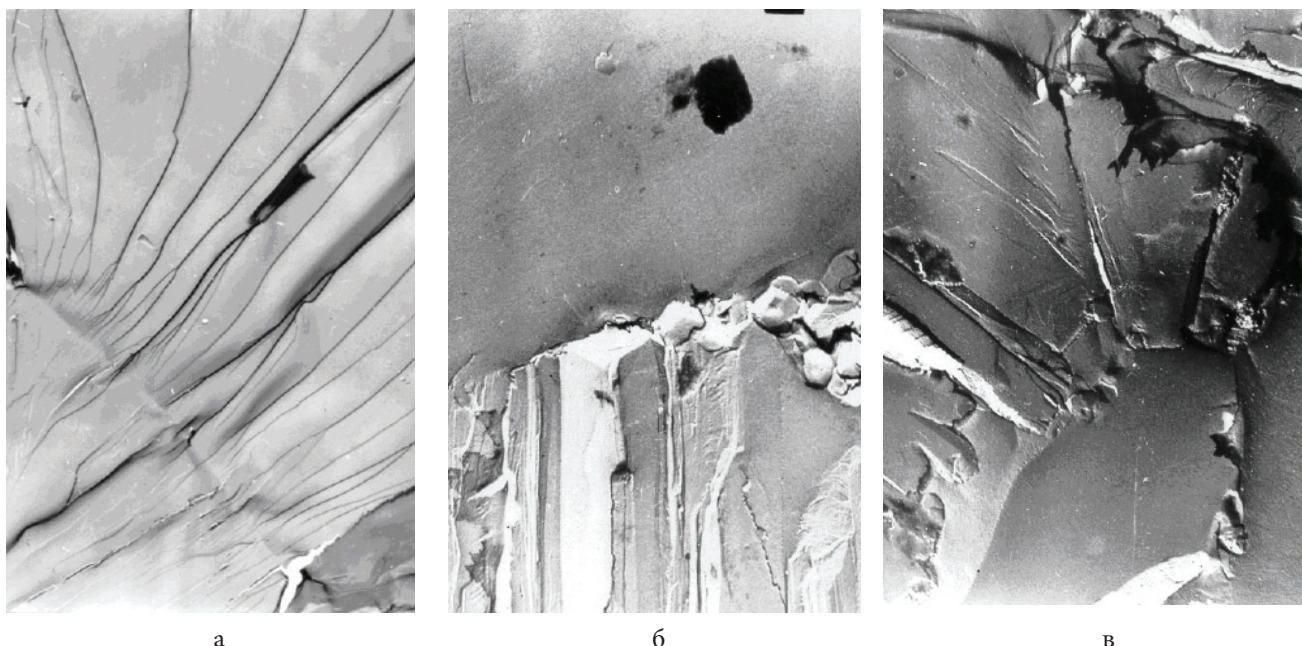


Рис.2. Фрактограммы разрушенных образцов бериллия партии Т20 при температуре 293К: а–начало; б–середина; в–конец трещины.

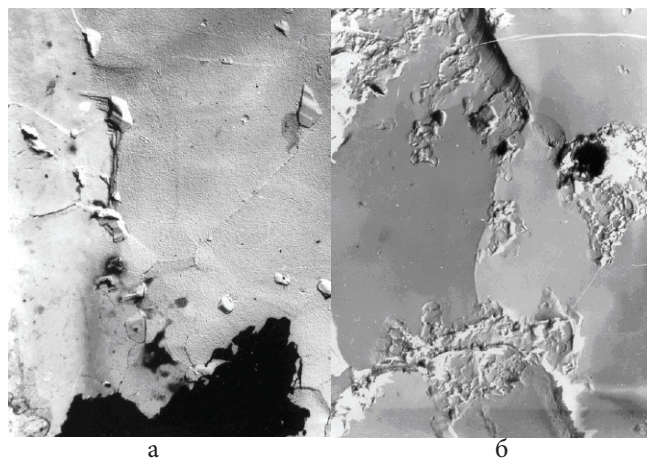


Рис.3. Вид поверхности разрушения образцов бериллия партии Т20 после закалки: а - середина, б - конец трещины.

тонкого скольжения (рис. 2б). В области, соответствующей концу пути распространявшейся трещины у торца образца, доля скола по зерну и по границам приблизительно одинакова (рис.2в).

Частицы оксида имеют размеры 0,2-0,3 мкм и распределены внутри зерна сравнительно равномерно.

После закалки характер разрушения резко меняется: увеличивается вклад межкристаллитного разрушения (табл. 1) и в местах разрушения по границам зерен наблюдается неравномерно распределенные скопления оксида (рис. 3а). Другой особенностью разрушения закаленных образцов является наличие мест вязкого разрушения на всем протяжении длины трещины (рис. 3б). При последующем старении закаленных образцов характер их разрушения вновь приближается к виду, типичному для металла в исходном состоянии (табл.1).

При температурах 77 и 193 К у образцов партий Т56 преобладает транскристаллитное разрушение (которое происходит преимущественно сколом по плоскости базиса) на всем пути распространения трещины. В меньшей степени наблюдается разрушение по границам зерен, которое проявляется большей частью в слу-

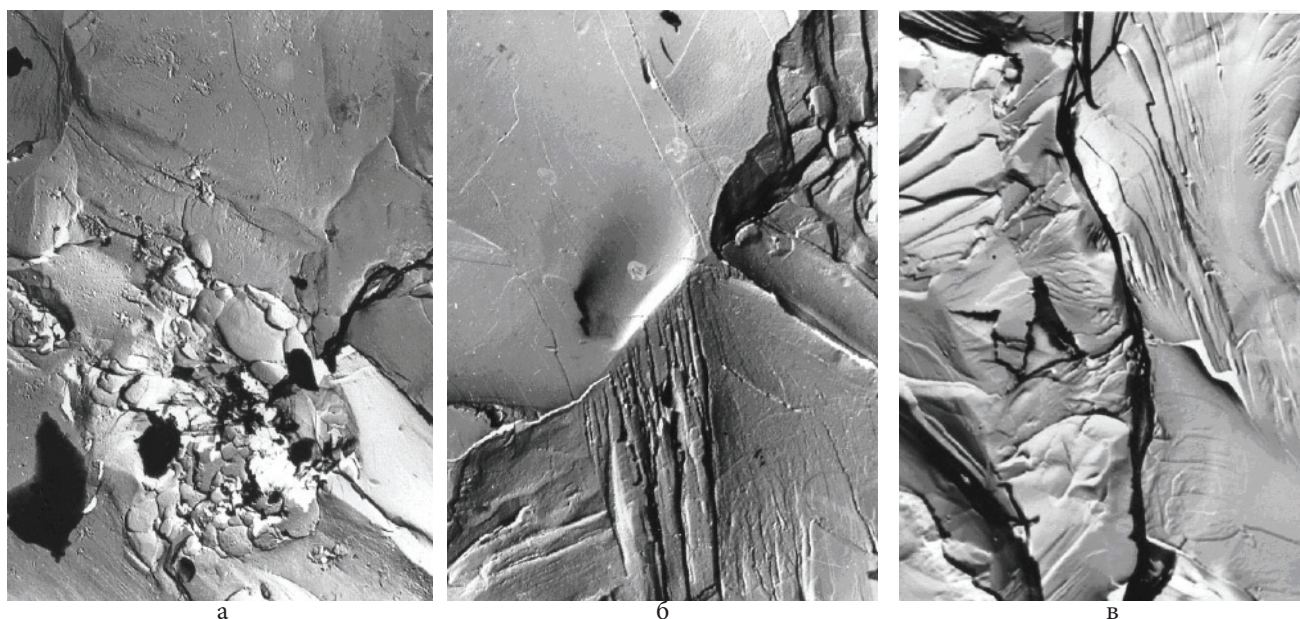


Рис.4. Фрактограммы разрушенных образцов бериллия партии Т56 при температуре 77 К: а–начало; б –середина; в–конец трещины.

чае мелких зерен. На рис. 4 представлены электронные фрактограммы, снятые с образца, испытанного при температуре 77 К. Рис. 4 а, б и в относится 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. Просмотр стереопар свидетельствует о сравнительно невысоком рельефе поверхности разрушения. Скольжение в зоне разрушения при 77 К встречается относительно редко (рис. 4 а), причем поперечное скольжение вообще отсутствует. Фрактограммы образцов, разрушенных при комнатной температуре и 77К, в значительной степени подобны (рис.5). Для этих образцов также характерно преимущественное разрушение по плоскости спайности (0001) с увеличением вклада хрупкого отрыва по мере движения трещины от начала (рис.5а) к концу (рис. 5в). Излом имеет типичный

ручьевидный характер с более глубоким, чем при 77 К, рельефом. Отличительные особенности излома по сравнению с низкотемпературным разрушением следующие. Наряду с тонким базисным скольжением при 193К наблюдается поперечное скольжение (рис. 5 б), однако, как и при 77К, пластическая деформация при разрушении развита очень слабо, и следы скольжения наблюдаются редко. При разрушении образца при 193К на нескольких снимках наблюдается необычный рельеф в виде вытянутых фрагментов (рис.6).

Просмотр стереопар показывает, что фрагменты имеют лестничную структуру с дополнительной фрагментацией поперек ступенек. Подобная структура излома наблюдалась впервые, и ее природа пока не выяснена.

Вид изломов образцов, испытанных при 503 и 683К, существенно отличается от характера низкотемпературного разрушения. Наряду с участками скола встречаются обширные области пластической деформации (рис.6

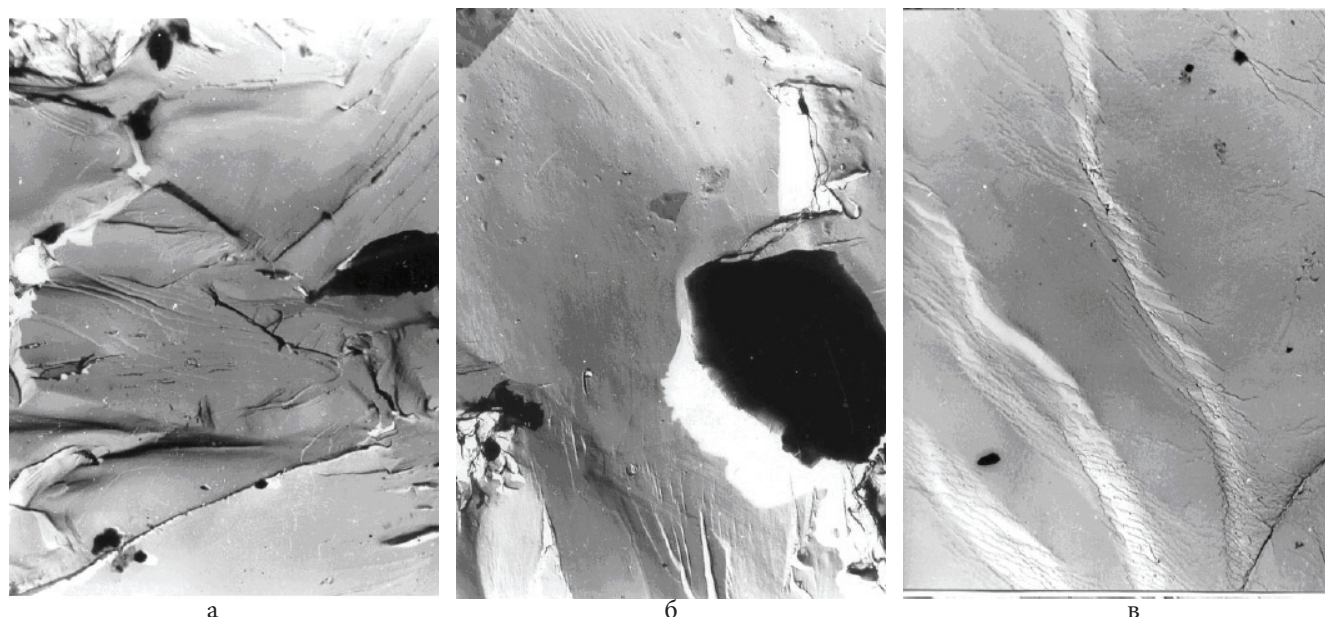


Рис. 5. Фрактограммы разрушенных образцов бериллия партии Т56 при температуре 293 К: а–начало; б–середина; в–конец трещины.

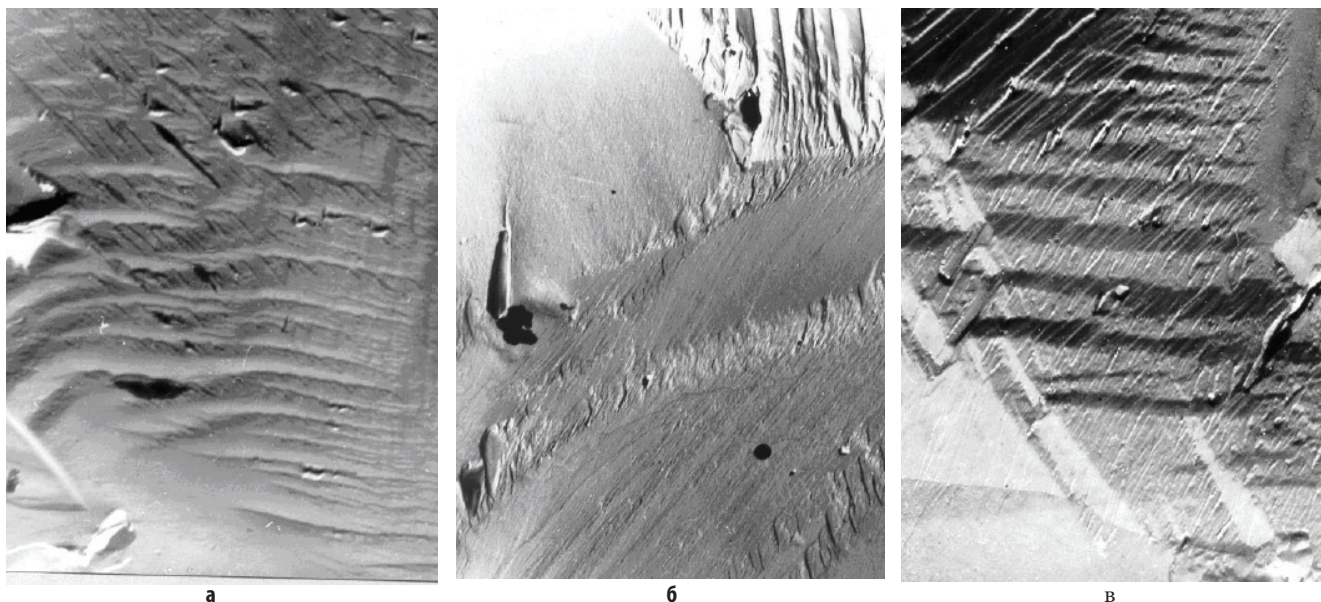


Рис. 6. Фрактограммы разрушенных образцов бериллия партий Т56: а–начало; б–середина; в–конец трещины.

б,в). Характерно, что такие области наблюдаются не только в начале, но и в конце трещины. При температуре испытаний 473К вид излома промежуточный, то есть наряду с обычными сколами наблюдается зоны пластической деформации.

В этом отношении весьма показателен снимок, представленный на рис. 6в. Видно, что разрушение сколом в одном зерне сосуществует с областью сильной пластической деформации в соседнем зерне.

Некоторое воздействие на структуру металла оказывает термообработка. Старение при 823К в течение 47 часов сопровождается образованием выделений. Однако характер разрушения при комнатной температуре заметным образом не меняется. Существенной особенностью разрушения является то, что крупные выделения слабо влияют на распространение трещины (рис. 7а).

Данные о влиянии закалки противоречивы. Для партии бериллия Т56 закалка приводит к возрастанию вклада разрушения по границам зерен и к крайней неоднородности в распределении оксида: отдельные участки сплошь состоят из оксидных включений (рис. 7 б). Для партии Т56 закалка сопровождается двумя структурными эффектами: возрастанием доли межзеренного разрушения и увеличением вклада хрупкого

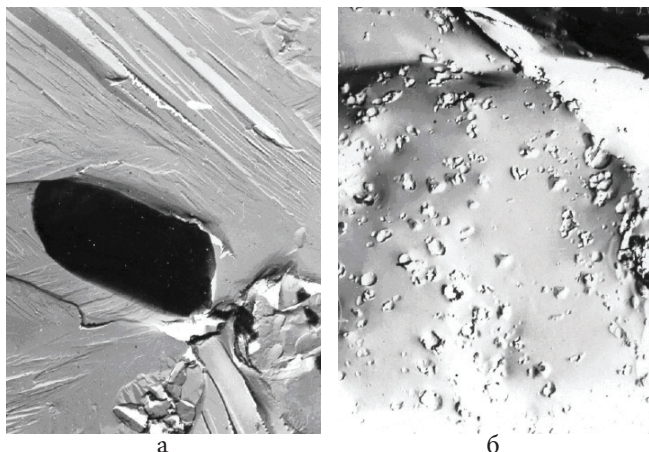


Рис.7. Вид поверхности разрушения образцов бериллия партии Т56 а–после термообработки; б– после закалки.

разрушения в начале трещины. Некоторые области фрактограмм могут быть истолкованы как зоны микро-трещин, которые образуются при закалке вблизи границ зерен.

Анализ структуры разрушенных образцов показал, что между видом излома и величиной K_{Ic} наблюдается следующая тенденция: крупнозернистый излом обычно соответствует более низким значениям K_{Ic} . То же относится и к однородным гладким изломам, образующимся при низких температурах. Шероховатые изломы, обычно с ручьевидными узорами как правило, соответствуют максимальным значениям вязкости разрушения. Однако здесь имеется одно существенное исключение - закалка бериллия сопровождается образованием наиболее шероховатого излома с крупными вырывами и «буграми», но огрубление излома в этом случае не ведет к росту вязкости разрушения.

Изучение фрактографий и характера макроскопического разрушения образцов позволяет сделать заключение о том, что, по-видимому, следует разделять две группы факторов, влияющих на величину K_{Ic} - первая связана с характером пластической деформации и ее зависимостью от температуры; вторая-с особенностями распределения вторичных фаз. При низких температурах (<473К), когда пластичность бериллия ограничена, определяющую роль в сопротивлении распространению трещин в бериллии играют выделения, а пластическая зона в вершине трещины мала. С ростом температуры из-за атермической природы факторов второй группы начинают доминировать процессы пластической деформации, затрудняющие распространение трещины.

Из сравнения полученных значений вязкости разрушения с такими структурными характеристиками, как величина зерна или количество примесей (в том числе содержание BeO), можно заключить что в отличие от пластической деформации какая-либо простая связь между ними отсутствует. Очевидно, при распространении трещин важно не только общее содержание примесей (в т.ч. BeO), но также - величина и характер распределения включений. Вместе с тем ясно, что при 293К повышение

содержания BeO до 1-1,3% (Т-20 и Т-56) способствует улучшению вязкости разрушения по сравнению с бериллием сорта Д-20 с содержанием BeO 0,6-0,85%. При высоких температурах, наоборот, повышение содержания BeO нежелательно. По-видимому, при анализе проблемы влияния примесей (в т.ч. BeO) на величину K_{Ic} их концентрацию нельзя рассматривать в отрыве от других структурных характеристик, так как при равном содержании BeO изменение размера зерна повлечет за собой существенные изменения в распределении выделений и, следовательно, может нарушить указанную тенденцию.

Изучение структуры поверхности разрушения подтверждает увеличение пластической зоны с ростом температуры. Анализ фрактограмм указывает также на то, что при комнатной температуре увеличению вязкости разрушения сопутствует возрастание доли поверхности, занятой включениями (главным образом BeO). Что касается механизма образования и вклада двух описанных ранее зон разрушения в сопротивление распространению трещин, то эти вопросы нуждаются в дальнейшем изучении.

Выводы

1. Изучена зависимость вязкости разрушения различных сортов бериллия от чистоты, размера зерна, и режимов термообработки. Вязкость разрушения бериллия заметно меняется от партии к партии и сложным образом зависит от температуры. При 293К она максимальна у металла сорта Т-56, а при высоких температурах - у бериллия сорта Д-20.

2. Характер разрушения при низких температурах (293 и 77К) слабо меняется при переходе от одного сорта бериллия к другому. При высоких температурах скол состоит из нескольких зон, и характер разрушения зависит от сорта металла

3. Изучена температурная зависимость вязкости разрушения различных сортов бериллия в области температур 77-573К. Установлено, что значения вязкости разрушения заметно меняются от партии к партии материала и сложным образом зависят от температуры.

4. Наличие выделений способствует увеличению вязкости при $T < 473\text{K}$, а факторы, облегчающие пластическую деформацию, сказываются сильнее при $T > 473\text{K}$.

5. 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 473К). При низких температурах ($< 473\text{K}$), определяющую роль в сопротивлении распространению трещин в бериллии играют вторичные фазы, а с ростом температуры начинают доминировать процессы пластической деформации.

Литература

1. I. Papiro, Beryllium – structural material. Moscow, Mashinostroenie, 158 (1977). (in Russian) [И.И.Папилов. Бериллий - конструкционный материал. М: «Машиностроение», 1977, 158 с]
2. L. Kornienko, A. Nikolaenko, I. Papiro, P. Stoev, Y. Tuzov, A. Homutov. Atlas structures of Beryllium. Dubna, 210 (2009). (in Russian) [Л.А.Корниенко, А.А. Николаенко, И.И.Папилов, 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, 351(1979).
4. I. Papiro. Plastic deformation of Beryllium. Moscow,: Atomizdat, 304 (1973). (in Russian) [И.И.Папилов. Пластическая деформация бериллия. М:Атомиздат,1973– 304 с.]
5. I. Papiro, P. Stoev, A. Nikolaenko, Y. Tuzov, A. Homutov. Influence of the residual thermal stress on characteristics of fracture toughness and working capacity hot-pressing beryllium, VANT, **6**(76) (2011). (in Russian) [И.И.Папилов, 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), 2011, стр. 37-41].
6. Y. Tuzov, A. Homutov, A. Nikolaenko, I. Papiro, P. Stoev Kinetics of recrystallization of the beryllium strained in the various ways. Chemical engineering, **10**(8) (2009). (in Russian) [Ю.В.Тузоз, А.М.Хомутов, А.А.Николаенко, И.И.Папилов, П.И.Стоев. Кинетика рекристаллизации бериллия, деформированного различными способами. Химическая технология, т.10, №8, 2009, стр. 460-466.]