

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОПЛАСТИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ГОРЯЧЕПРЕССОВАННЫХ СОРТОВ БЕРИЛЛИЯ

В. И. Иванцов

*Национальный Научный Центр «Харьковский физико-технический институт»,
г. Харьков, Украина, E-mail: nsc@kipt.kharkov.ua, Тел: (057) 335-62-27.*

Исследовано влияние термоциклической обработки на микропластические характеристики и поведение в области микродеформаций двух горячепрессованных сортов бериллия, отличающихся технологическими параметрами компактирования и, соответственно, значениями сопротивления микропластическим деформациям. Установлено, что поведение σ_{ϵ} при термоциклической обработке (ТЦО) в значительной мере определяется технологией его получения, приводящей к различию в исходных значениях характеристик микропластичности и уровнях внутренних микронапряжений.

ВВЕДЕНИЕ

Выбор материалов для прецизионных изделий невозможен без детального исследования влияния структурных и технологических факторов, в частности, стабилизирующей ТЦО на микропластичность и размерную стабильность различных сортов бериллия.

В основу методов повышения сопротивления металлов и сплавов микропластическим деформациям должен быть положен принцип обеспечения стабильности их структурного состояния в условиях эксплуатации. Решение указанной задачи может быть достигнуто на основе следующих методов стабилизации [1]:

- термического и термомеханического упрочнения сплавов;
- термоциклического воздействия;
- дорекристаллизационного отжига материалов и изделий с наклепанным поверхностным слоем;
- термообработки в напряженном состоянии;
- механико-термической обработкой.

Особый интерес представляют исследования влияния структурных и технологических факторов, а также ТЦО на микропластичность и размерную стабильность различных сортов бериллия.

Необходимость изучения поведения бериллия при термоциклировании вызвана следующими обстоятельствами:

- отсутствием информации об изменении структуры и свойств бериллия при различных условиях термоциклирования;
- уточнение возможности снятия внутренних напряжений после небольшого числа циклов.

Оба обстоятельства имеют большое практическое значение: первое - потому, что в реальных изделиях атомной и космической техники возникают значительные регулярно меняющиеся термоциклы; второе - вследствие того, что размерная стабильность может быть обеспечена только при условии полного прекращения релаксации внутренних напряжений. Поэтому необходим поиск режимов оптимальных обработок для снятия внутренних напряжений в бериллии.

В металлах с ГПУ-структурой при изменении

температуры образуются значительные микронапряжения, являющиеся следствием анизотропии теплового расширения зерен. В литературе влияние теплосмен на свойства металлов ранее рассматривалось чаще в связи с их формоизменением и термической усталостью [2-4]. Более детальные исследования [5-7] показали, что путем термоциклирования можно повышать релаксационную стойкость горячепрессованного бериллия и изделий из него. При этом было установлено, что эффективность обработки возрастает с увеличением интервала температур циклирования и увеличения числа циклов.

Наряду с повышением релаксационной стойкости ТЦО приводит к увеличению предела упругости $\sigma_{0.001}$ приблизительно в 2 раза. Величина микронапряжений после ТЦО ниже, чем после нагрева, соответствующего эквивалентной выдержке при верхней температуре цикла. Снижение уровня микронапряжений происходит практически за три цикла охлаждения и нагрева.

Наблюдаемое повышение сопротивления бериллия микропластическим деформациям при длительном нагружении связывается, главным образом, с протекающими при теплосменах процессами ускоренной релаксации микронапряжений в микрообъемах и стабилизации структуры.

Поскольку деформация при ТЦО сопровождается интенсивными процессами возврата, после нескольких циклов обработки создается стабильная дислокационная структура, обеспечивающая минимальный уровень микро- и макронапряжений.

1. ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования прецизионных характеристик методом механостатического гистерезиса в данной работе использована машина для испытания микрообразцов при статическом растяжении конструкции ННЦ ХФТИ. Скорость перемещения захвата составляла $5.4 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$, благодаря чему было обеспечено необходимое разрешение измеряемых характеристик микропластичности.

В качестве силоизмерителя применяли цилиндрический упругий элемент с тензорезисторной системой измерения нагрузки.

Для измерения деформации образцов использовали датчики сопротивления типа 2ПКБ-20-200 с базой 20 мм, равной длине рабочей части образцов.

Погрешность определения нагрузки не превышала $\pm 1\%$, деформации $\pm 2 \cdot 10^{-7}$ единиц относительной деформации (е.о.д.).

Образцы для исследования микропластичности вырезали электроискровым способом, их размеры: длина рабочей части 20 мм, поперечное сечение 3 ± 3.5 мм². Данное соотношение размеров плоских образцов удовлетворяет условиям обеспечения высокой чувствительности по деформации при использовании тензорезисторов с соответствующей базой.

В экспериментах определяли следующие величины, характеризующие поведение материалов в области микродеформаций ($10^{-7} \pm 10^{-3}$ е.о.д.) [8]:

- микроскопический предел упругости σ_E - напряжение, при котором обнаруживается отклонение от линейного упругого поведения материала при нагружении;
- микроскопический предел текучести σ_A - напряжение, при котором наблюдается первая остаточная деформация $\epsilon = 2 \cdot 10^{-7}$;
- остаточную деформацию ϵ после каждого цикла нагрузки образца;
- модуль Юнга E в области микропластичности.

В качестве исследуемого материала были использованы два сорта горячепрессованного бериллия ГП 1166 и ГП 1172. Они были получены из порошка бериллия технической чистоты (Fe – 0,17; Mg – 0,014; Si – 0,0013; O – 1,1 %) с фракционным составом: $\leq 10 \mu$ - 12%, (10...40) μ - 80%, более 40 μ - остальное. При этом были использованы различные режимы (температура и давление) уплотнения: ГП 1166...1353 К, 8 МПа; ГП 1172...1493 К, 5 МПа.

Термоциклическую обработку бериллия проводили в интервале температур 873 \leftrightarrow 300 К (масляная ванна) с общим количеством циклов, равным 5. Скорость изменения температуры составляла около 30 град./с. Часть образцов после ТЦО подвергали старению при температуре 873 К, 2 ч на воздухе.

Электронно-микроскопические исследования проводили на электронном микроскопе TESLA-BS-613 методом тонких фольг “на просвет”.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Различие в режимах уплотнения порошка приводит к различным величинам сопротивления микропластическим деформациям металла (см. табл.). Возможной причиной этого является различный уровень остаточных напряжений в исследуемых партиях горячепрессованного бериллия (рис.1).

В результате термоциклической обработки бериллия с высокими значениями сопротивления микропластическим деформациям в исходном состоянии (ГП 1166) наблюдается значительное разупрочнение (см. табл.). Так, напряжение микротечения σ при остаточной деформации $\epsilon = 10^{-5}$ снижается в ре-

зультате ТЦО более чем в 4 раза по сравнению с исходным состоянием. Коэффициент деформационного упрочнения в области деформаций $(1,5 \dots 6) \cdot 10^{-6}$ снижается в результате воздействия ТЦО более чем в 10 раз (с $24,2 \cdot 10^6$ МПа в исходном состоянии до $2,2 \cdot 10^6$ МПа после ТЦО) (рис.2, 3).

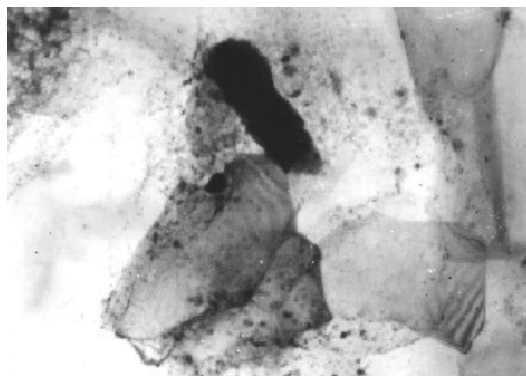


Рис. 1. Микроструктура бериллия сорта ГП 1166 в исходном состоянии, ув. 12000

В то же время термоциклическая обработка и старение при 873 К, 1 ч горячепрессованного бериллия с низкими значениями сопротивления микропластическим деформациям в исходном состоянии оказывает слабое влияние на характеристики микропластичности (см. табл.).

Согласно данным работы [5] в процессе термоциклирования происходит перераспределение дислокаций и образование более стабильной структуры с меньшей плотностью дислокаций в скоплениях и с более выпрямленными дислокационными петлями и меньшим количеством порогов на дислокациях. Вместе с тем одновременно понижается уровень микронапряжений в металле. В результате повышается сопротивление металла микропластическим деформациям при кратковременных и длительных испытаниях. Кроме того, у стареющих сплавов, как и является бериллий [7], при теплосменах, по-видимому, ускоряются процессы старения, и образуется более устойчивая структура.

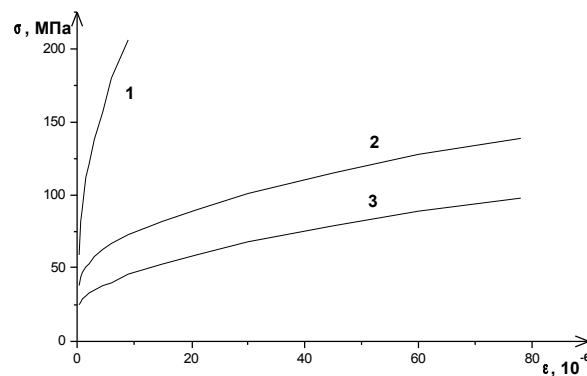


Рис. 2. Зависимость напряжения микротечения σ от остаточной деформации ϵ для бериллия партии 1166: 1 - исходное состояние; 2 - ТЦО 873 \leftrightarrow 300 К и старение 873 К, 1 ч; 3 - ТЦО 873 \leftrightarrow 300 К

Характеристики микропластической деформации горячепрессованных сортов бериллия после различных условий термообработки

Материал, партия	Термообработка	σ_E , МПа	σ_A , МПа	σ , МПа при ϵ	
				$2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$
ГП 1166 (повышенной прочности)	исходное состояние	15,0	56,0	121	210
	ТЦО 873 \leftrightarrow 300 К	20,8	27,0	33	47
	ТЦО 873 \leftrightarrow 300 К + отжиг 873 К, 1 ч	23,8	38,6	53	74
ГП 1172 (пониженной прочности)	исходное состояние	9,1	20,7	35	52
	ТЦО 873 \leftrightarrow 300 К	-	26,8	43	60
	ТЦО 873 \leftrightarrow 300 К + отжиг 873 К, 1 ч	17,4	23,3	32	50

На основании полученных результатов по ТЦО и старению ГП бериллия можно сделать вывод, что поведение материалов при термоциклировании в значительной мере определяется технологией их получения и уровнем исходных механических свойств и микронапряжений термического происхождения. Это согласуется и с результатами нашей предыдущей работы, полученными на изостатически прессованных сортах бериллия [9]. Кроме того, необходимо учитывать, что изменения в пределах паспортных данных химического состава исходного порошка, особенно по примесям *Fe*, *Si*, приводят к значительным изменениям в поведении компактного материала при старении.

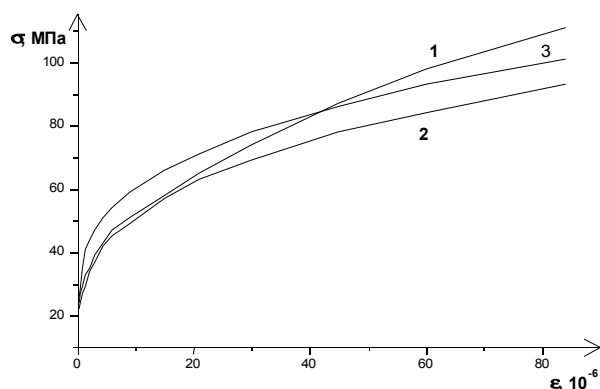


Рис. 3. Зависимость напряжения микротечения σ от остаточной деформации ϵ для бериллия партии 1172: 1 - исходное состояние; 2 - ТЦО 873 \leftrightarrow 300 К и старение 873 К, 1 ч; 3 - ТЦО 873 \leftrightarrow 300 К

3. ВЫВОДЫ

1. Поведение бериллия при ТЦО в значительной мере определяется технологией его получения, приводящей к различию в исходных значениях характеристик микропластичности и уровнях термических микронапряжений.
2. ТЦО 873 \leftrightarrow 300 К горячепрессованного бериллия с высокими значениями сопротивления микропластическим деформациям в исходном состоянии приводит к значительному разупрочне-

нию в микропластической области, тогда как у менее прочного горячепрессованного бериллия влияние ТЦО на микропластичность слабое.

Данная работа выполнена при поддержке фонда CRDF.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.И. Гаврюсев. *Геометрическая стабильность металлических приборных конструкций и технологические методы ее повышения*. Л.: ЦНИИ «Румб», 1981, с. 146.
2. И.Н. Давиденко, В.А. Лихачев. *Необратимое формоизменение металлов при циклическом тепловом воздействии*. М.: «Машиниздат», 1962, с. 224.
3. B.J. Verkin, F.F. Lavrentiev, J.S. Braude, et. al. Influence of Low-Temperature Thermocycling on Anisotropy of the Structural State of Commercial Purity Beryllium // *Cryst. Res. Technol.* 1984. Vol. 19. № 11, p. 1477-1482.
4. Г.А. Малыгин, В.А. Лихачев. *Роль анизотропии теплового расширения и тепловых микронапряжений* // *Зав. лаб.* 1966. № 3, с. 335-347.
5. М.Л. Хенкин, И.Х. Локшин. *Размерная стабильность металлов и сплавов в точном машиностроении и приборостроении*. М.: «Машиностроение», 1974, с. 256.
6. Е.Ф. Дударев, Е.Е. Дерюгин. Микропластическая деформация и предел текучести поликристаллов // *Изв. ВУЗов. Физика*. 1982. № 6, с. 43-55.
7. И.Х. Локшин, М.Л. Хенкин, И.К. Левина. Изменение сопротивления микропластическим деформациям бериллия при старении // *МиТОМ*. 1972. № 3, с. 54-55.
8. Н. Браун. *Наблюдения микропластичности «Микропластичность»*. Перев. с англ. М.: «Металлургия», 1972, с. 37-61.
9. В.И. Иванцов, И.И. Папилов. Микропластичность и размерная стабильность бериллия // *ВАНТ. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение*. 1998. Вып. 6(72), с. 121-125.