

УДК 622.349.345:621.7.019

БЕРИЛЛИЙ — СОСТОЯНИЕ, ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ В ТЕРМОЯДЕРНОЙ ТЕХНИКЕ

Ю.В. Тузов, Ю.Е. Маркушкин (ОАО «Высокотехнологический институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» (ОАО «ВНИИНМ»), Москва, Россия), Е.С. Краснощёков (ФГУП «БАЗАЛЪТ», Саратов, Россия)

Проанализированы результаты исследований по созданию специальных сортов бериллия, наиболее пригодных для использования в термоядерной технике (защита первой стенки ИТЭР, бридерный бланкет и др.). Рассмотрены теоретические основы термической прочности порошкового бериллия и разработки технологических процессов получения бериллия, способного хорошо релаксировать возникающие термические микронапряжения. Рассмотрены механизмы релаксации напряжений. Основным вклад в релаксацию вносят ротационные (дисклинационные) моды деформации, разновидностью которых является проскальзывание по границам зёрен, определяемое количеством и дисперсностью зернограницных включений оксида и интерметаллидов бериллия. Для порошковой технологии бериллия определены участки и звенья технологического процесса, на которых формируется структура включений оксида и интерметаллидов, и даны рекомендации по организации производства бериллиевых пластин. Рассмотрены технологии изготовления и применения бериллия с гарантированно открытой пористостью и показана перспективность его применения.

Ключевые слова: бериллий, порошковая металлургия, остаточные термические микронапряжения, термическая прочность, механические свойства, нанокристаллический бериллий, пористый бериллий, применение.

BERYLLIUM — STATE OF THE ART, POSSIBILITIES AND PROSPECTS FOR FUSION TECHNOLOGY APPLICATION. Yu.V. TUZOV, Yu.E. MARKUSHKIN, E.S. KRASNOSCHEKOV. The problems connected with creation of the most suitable for fusion devices Be grades are analyzed (first wall shielding, breeding blanket, etc.). The theoretical background of thermal strength of powder metallurgy produced beryllium and some peculiarities of beryllium production with good relaxation characteristics are discussed. Different relaxation mechanisms are considered and it is shown that the grain boundary sliding plays the main role during relaxation process which depends on the quantity and dispersion degree of grain boundary oxide and intermetallic inclusions. On the basis of above mentioned considerations some recommendations concerning the technological process of production of beryllium tiles for the ITER first wall protection are offered. The manufacture and using of beryllium with fully open porosity are considered and the prospects of such material for breeding blanket is demonstrated.

Key words: beryllium, powder metallurgy, residual thermal microstresses, thermal strength, mechanical properties, nanocrystalline beryllium, porous beryllium, application.

ВВЕДЕНИЕ

Уникальные физические, теплофизические, электрофизические, удельные физико-механические и ядерные свойства бериллия позволяют использовать его в ядерной и термоядерной технике и других отраслях промышленности [1—2]. Например, бериллий выбран международным сообществом в качестве защитного экрана первой стенки термоядерной установки ИТЭР вследствие его малой плотности и высокой термической прочности. Однако работоспособность бериллия существенно зависит от структурно-фазового состояния конкретных изделий из него, определяемого технологией их получения. В настоящей работе рассмотрены структурные особенности бериллия, определяющие его работоспособность в различных условиях, в том числе в условиях термоядерного реактора (первая стенка, бридерный бланкет и др.).

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ БЕРИЛЛИЯ

Металлический бериллий (гексагональная плотноупакованная кристаллическая решётка) является существенно упругоанизотропным металлом, степень упругой анизотропии которого определяется соответствующими коэффициентами $A = 2c_{44}/(c_{11} - c_{12})$, $B = c_{33}/c_{11}$ и $C = c_{12}/c_{13}$ (c_{ij} , $i, j = 1-3$ — упругие постоянные), значения которых всегда и при всех температурах отличаются от значения $A = B = C = 1$, соответствующего приближению изотропной среды, причём для бериллия такие отклонения особенно значительны [1, 2].

Поведение электронов в бериллии не соответствует модели свободных электронов и описывается сферически несимметричными волновыми функциями для электронов р-оболочек. Перекрывание р-оболочек

происходит в наиболее плотных плоскостях базиса $\{0001\}$ и отсутствует в направлении гексагональной оси $\langle 0001 \rangle$, из-за чего силы межатомной связи носят направленный (ковалентный) характер в плоскости базиса в направлениях $\langle 11\text{—}20 \rangle$ и металлический характер вдоль гексагональной оси. Такой характер межатомных сил обуславливает особенности кристаллического строения, когда решётка бериллия «сжата» вдоль гексагональной оси (отношение параметров кристаллической решётки $c/a = 1,567$) по сравнению с «идеальной» ГПУ-решёткой ($c/a = 1,633$). Это проявляется во многих процессах и, в частности, в элементарных процессах пластической деформации и разрушения [1, 2]:

— плоскость базиса является плоскостью легкого скольжения (основная система $\{0001\}\langle 11\text{—}20 \rangle$) и разрушения одновременно, причём напряжение скольжения слабо зависит от температуры;

— по крайней мере, при комнатной температуре отсутствуют небазисные системы скольжения, т.е. бериллий не удовлетворяет известному критерию Мизеса—Тейлора, требующему для сохранения сплошности в процессе деформации поликристалла существования пяти независимых систем скольжения. Определённую возможность для деформации вдоль оси С может дать двойникование $\{10\text{—}12\}\langle 10\text{—}11 \rangle$, приводящее к дилатации решётки вдоль гексагональной оси. Максимальная относительная деформация при двойниковании монокристаллов бериллия составляет около 8%, при этом двойникованию в поликристаллическом бериллии подвергается не более 10% зёрен, т.е. максимальный вклад двойникования в общий ресурс пластичности не превышает 1%.

У бериллия имеются только четыре независимых системы скольжения (в плоскостях базиса и призмы с общим направлением скольжения $\langle 11\text{—}20 \rangle$), т.е. совокупность известных для бериллия механизмов пластической деформации и разрушения вообще не позволяет рассчитывать на достижение какой-либо пластичности у нетекстурированного металла. Однако поликристаллический бериллий (как литейного, так и порошкового происхождения) обладает заметной пластичностью. Это, по-видимому, связано с тем, что в поликристаллическом (близком к изотропному) бериллии ведущую роль при деформации играют эффекты, связанные с уникальностью теплофизических и физико-механических свойств его кристаллитов. Например, анизотропия коэффициента термического линейного расширения монокристалла бериллия вдоль (α_{\parallel}) и поперёк (α_{\perp}) гексагональной оси, которая в сочетании с высокими упругими модулями и температурой плавления является причиной больших остаточных термических микронапряжений (ОТМ) в поликристаллическом металле. Известно [1, 2], что при 20 °С величина $\alpha_{\parallel} = 8,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_{\perp} = -10,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, т.е. анизотропия составляет ~20%. В то же время средний коэффициент термического расширения поликристаллического бериллия равен $9,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Таким образом, после остывания от некоторой равновесной температуры в поликристаллическом бериллии неизбежно возникнут ОТМ, реальная величина которых будет определяться способностью конкретной структуры к релаксации напряжений в процессе остывания. Важно, что в поликристаллическом бериллии при комнатной температуре каждое зерно сжато вдоль гексагональной оси и растянуто в азимутальных направлениях, т.е. ОТМ блокируют разрушение по плоскостям базиса. Поскольку разрушение по плоскостям базиса является основным видом разрушения бериллия, то прочность должна возрастать с ростом ОТМ. На рис. 1 представлены результаты измерений предела прочности и относительного удлинения. Видно, что предел прочности линейно возрастает с ростом ОТМ, относительное удлинение имеет максимум при некотором значении ОТМ.

Величина ОТМ, фиксируемая рентгеновским методом при комнатной температуре, характеризует глубину протекания релаксации в процессе остывания. То же самое можно сказать и о прочности, поскольку, как следует из рис. 1, между прочностью и ОТМ существует линейная связь. С практической точки зрения важно выделить те механизмы релаксации, которыми можно управлять, варьируя технологический режим. Очевидно, что диффузионные и диффузионно-дислокационные механизмы релаксации идут с заметной скоростью при повышенных температурах, т.е. когда сами микронапряжения невелики. Поэтому вклад этих механизмов не является определяющим. Что касается дислокационного скольжения в сочетании с поворотными (дисклинационными) модами деформации, то теоретически эти процессы возможны в любом диапазоне температур [3]. Более того, поскольку микронапряжения являются движущей силой этих процессов релаксации, то по мере снижения температуры их роль возрастает.

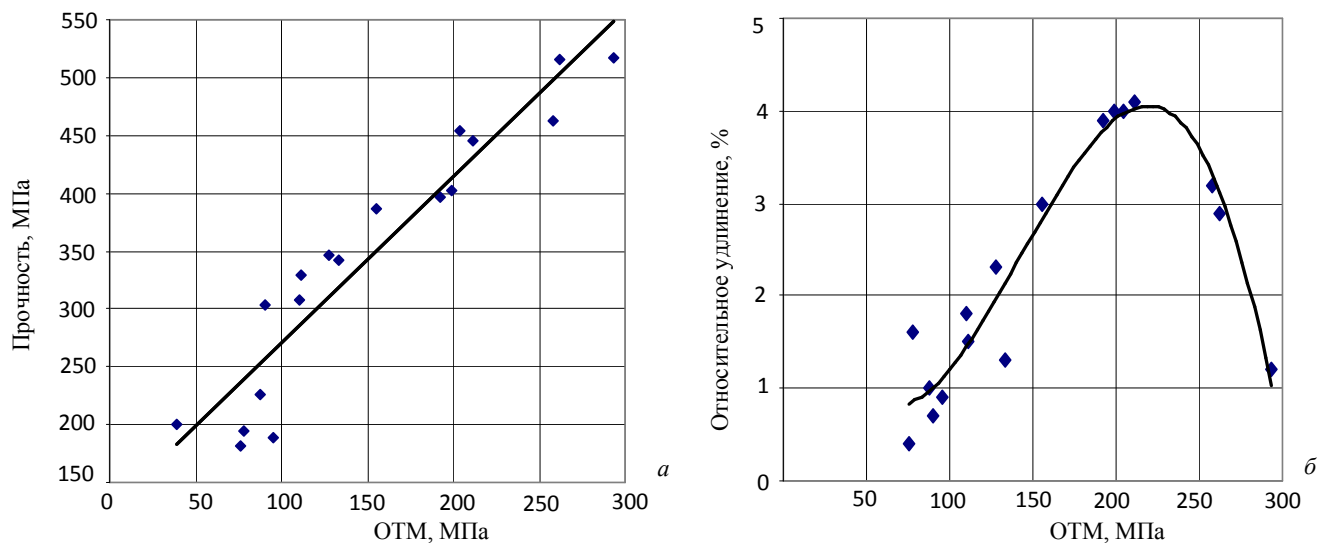


Рис. 1. Зависимость предела прочности (а) и относительного удлинения до разрушения (б) от величины остаточных термических микронапряжений в горячепрессованном бериллии при комнатной температуре

Одним из возможных путей реализации поворотных мод деформации является проскальзывание по границам зёрен, которое наблюдается при комнатной температуре в высокочистом бериллии литейного происхождения [2]. Очевидно, что зернограничные включения оксида, всегда присутствующие в структуре порошкового бериллия, препятствуют осуществлению межзёренного проскальзывания, удерживая тем самым более высокий уровень остаточных микронапряжений в порошковом металле по сравнению с бериллием литейного происхождения. Также очевидно, что количество и степень дисперсности зернограничных включений оксида должны оказывать существенное влияние на фиксируемую при комнатной температуре величину микронапряжений и, соответственно, предел прочности. Именно дисклинационные моды деформации в некоторой мере восполняют дефицит систем скольжения в бериллии и обеспечивают существование заметной пластичности у поликристаллического металла [4].

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОПРОЧНОСТИ

Учитывая, что предел прочности и относительное удлинение являются функциями одного аргумента (ОТМ), между ними также должна существовать взаимосвязь (рис. 2). При построении зависимости на рис. 2, помимо приведённых экспериментальных результатов, в данной работе использован большой массив данных по результатам механических испытаний текущей заводской продукции и лабораторных сортов горячепрессованного (ГП) бериллия. В результате (см. рис. 2) получено некоторое неоднородное множество точек, ограниченное огибающей линией.

На рис. 2 можно выделить три зоны (1—3). В зоне 1 металл с низкой прочностью обладает хорошей способностью к релаксации ОТМ и поэтому может быть предпочтительным для крупногабаритных изделий или для термопрочных конструкций, работающих в условиях резких перепадов температур. В зоне 3 с высокой прочностью материал относится к категории плохо релаксирующих и может быть использо-

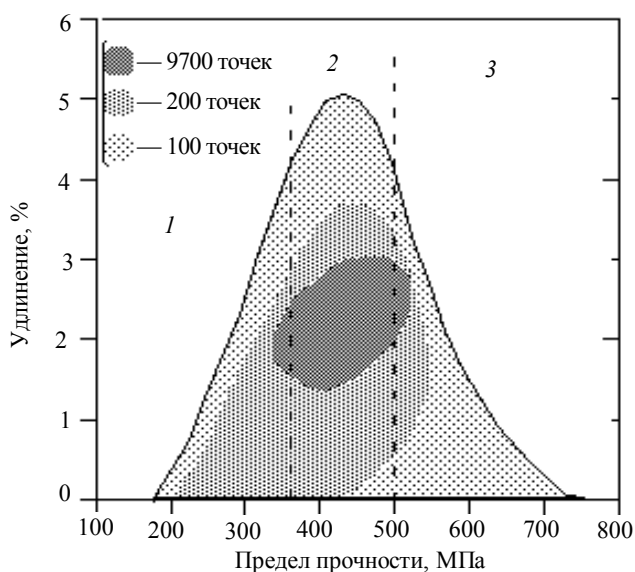


Рис. 2. Корреляция между относительным удлинением и прочностью для горячепрессованного бериллия. Испытания при комнатной температуре

ван для изготовления небольших изделий, от которых требуется высокая размерная стабильность. Зона 2 соответствует свойствам бериллия, обладающего максимальной работой разрушения, т.е. для общего конструкционного применения.

Зависимость «относительное удлинение δ — предел прочности σ_B » (см. рис. 2) представляет собой огибающую некоторого множества точек, каждая из которых есть результат единичного измерения механических свойств для различных сортов горячепрессованного бериллия. Точки, лежащие ниже кривой, соответствуют материалам с различными структурными неоднородностями, а материалы с «идеальной» структурой должны лежать на кривой или даже несколько выше неё. С практической точки зрения представляется важным выяснить, в какой степени отклонения от «идеальности» могут влиять на работоспособность изделий из бериллия. В развитие изложенных модельных представлений можно допустить, что величина отклонения конкретной экспериментальной точки от идеальной кривой должна количественно характеризовать как степень дефектности (неоднородности) структуры, так и работоспособность изготовленных изделий.

Под коэффициентом однородности структуры понимается степень отклонения конкретной точки от «идеальной» кривой (см. рис. 2), выраженная в долях единицы. Чем дальше от огибающей кривой находится точка, тем более неоднороден металл. Поскольку стойкость к термоудару, а также малоцикловая термическая усталость часто являются определяющими при использовании бериллия в различных конструкциях (термоядерный реактор ИТЭР и др.), то необходимо связать эти две характеристики с коэффициентом однородности структуры. Для этого было испытано на термочувствительность большое количество горячепрессованных образцов с различными сочетаниями прочности и пластичности, чтобы получить максимальный диапазон изменения коэффициента однородности (рис. 3) [5]. Испытывались материалы с невысокой прочностью (до 350 МПа), т.е. с хорошей способностью к релаксации. Все образцы были цилиндрической формы ($\varnothing 30 \times 30$ мм) после химического травления на глубину 0,25 мм для удаления повреждённого при токарной обработке поверхностного слоя.

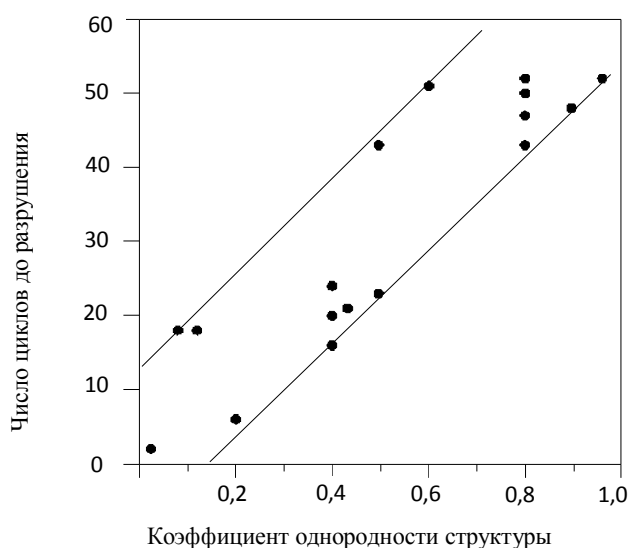


Рис. 3. Корреляция между термочувствительностью и коэффициентом однородности структуры при испытаниях на малоцикловую термическую усталость

Работоспособность оценивалась по максимальной величине перепада температуры, не вызывающего разрушения (появления трещин) образца. Термическое воздействие заключалось в нагревании цилиндрических образцов до определённой температуры (200—650 °С) и последующем охлаждении в воде комнатной температуры. При испытаниях на малоцикловую термическую усталость определялось количество термических ударов до разрушения образца. Результаты измерений по этим двум методикам хорошо коррелируют как между собой, так и с результатами, полученными на специализированных стендах США и Германии [6, 7]. Видно (см. рис. 3), что термочувствительность бериллия практически линейно увеличивается с ростом однородности структуры, т.е. в данном случае коэффициент однородности может характеризовать работоспособность изделия (заготовки).

Суммируя изложенное, можно констатировать, что рассмотренный подход к проблеме прочности и пластичности поликристаллического бериллия по существу является феноменологической моделью, позволяющей интерпретировать свойства бериллия с учётом его природной специфики. При использовании данного подхода задача управления механическими свойствами сводится к управлению величиной ОТМ, механизмы возникновения и релаксации которых известны и поддаются регулированию в рамках существующих технологических процессов порошковой металлургии. Однако сама по себе величина ОТМ, хотя и является одним из основополагающих параметров структуры, не может дать представления о реальной работоспособности изделий из бериллия в различных условиях. Можно сформулировать сле-

дующие основные принципы управления механическими свойствами и работоспособностью (в самом широком смысле) изделий из бериллия.

Достижение (получение) максимально однородной структуры на всех уровнях. Под однородностью понимается как можно более узкий интервал размеров зёрен, отсутствие грубых скоплений включений оксида и интерметаллидов, однородность химического состава и др. Также необходимо обеспечить однородность на макроуровне, т.е. структура должна быть одинаковой во всех точках изделия (заготовки). Однородная структура уже сама по себе гарантирует максимальную работоспособность, если только были выбраны соответствующие задаче значения механических свойств.

Механические свойства материала в изделии. Они связаны с ОТМ, величина которых зависит от степени релаксации, в том числе по механизму зернограничного проскальзывания на микроуровне (поворотные моды деформации). В свою очередь, степень (величина) зернограничного проскальзывания зависит от количества и качества распределения по размерам зернограничных включений оксида и интерметаллидов.

Технологические принципы управления размером зёрен, однородностью структуры и созданием необходимого распределения по размерам зернограничных включений оксида и интерметаллидов могут быть самыми различными. Однако в настоящее время, учитывая сравнительно небольшой объём потребления бериллия (исключая ИТЭР), экономически более целесообразно модифицировать (оптимизировать) существующие методы получения бериллиевых порошков и их компактирования с учётом существенной экологической опасности бериллиевого производства.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛЬНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

Рассмотрим кратко принятую на сегодняшний день на ФГУП «Базальт» технологию получения пластин бериллиевой облицовки для реактора ИТЭР [8]. Данная схема принципиально ничем не отличается от хорошо известной схемы, принятой в ОАО «УМЗ» (Казахстан) [9]. Изменения заключаются лишь в оптимизации параметров технологических процессов на основе рекомендаций, следующих из изложенной феноменологической модели и направленных на достижение максимальной однородности структурно-фазового состояния материала:

- стружкование исходных слитков с содержанием железа менее 0,1% (осуществляется на фрезерных станках);
- измельчение стружки в дисковых истирателях и классификация порошка (содержание фракции менее 10 мкм не должно превышать 5%, а фракции крупнее 40 мкм — не более 10%);
- смешение и аттестация партии порошка по химическому и гранулометрическому составу;
- холодное изостатическое прессование (ХИП) брикетов заданных размеров;
- горячее прессование (ГП) мерных заготовок;
- черновая механическая обработка ГП-заготовок для удаления слоя бериллия (~2 мм), контактировавшего с графитовой пресс-формой;
- аттестация ГП-заготовок; полученные заготовки могут быть использованы как для обработки давлением, так и для получения изделий путём мехобработки;
- электроэрозионная резка ГП-заготовки на пластины облицовки (ОАО «Базальт» и НПО «Композит»);
- химическое фрезерование пластин на глубину 0,2 мм для удаления повреждённого при электроэрозионной резке слоя;
- упаковка пластин и отправка.

Следует отметить, что в марте 2010 г. успешно завершена международная программа тепловых квалификационных испытаний российского бериллия. Предполагается, что размер пластин будет 25×25×8 мм, т.е. в ОАО «Базальт» для обеспечения вклада РФ в проект ИТЭР (40%) необходимо изготовить более 400 000 пластин общим весом около 4000 кг.

НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ БЕРИЛЛИЙ

В ОАО «ВНИИНМ» разрабатывается гидридная технология получения бериллия с нанокристаллической структурой [10—17], возможности использования которого (вакуумплотная фольга и др.) имеют очень важную, но пока узкую направленность. В настоящее время в ОАО «ВНИИНМ» получены первые тонкие вакуумплотные бериллиевые фольги для использования в электрофизических приборах.

Производство вакуумплотной фольги из бериллия с нанокристаллической структурой включает ряд последовательных технологических операций, основными из которых являются:

— синтез особоочистого гидрида бериллия, его пиролиз и получение объёмных беспористых заготовок нанобериллия;

— изготовление подката и прокатка фольг наноструктурированного бериллия толщиной 50—8 мкм.

Фольга представляет собой весьма наукоёмкую продукцию, а её стоимость при чистоте 99,5% составляет ~10 тысяч \$/г, а при чистоте 99,99 достигает 50 тысяч \$/г. Высокая цена вакуумплотной бериллиевой фольги связана с относительно небольшим потреблением в мире (до 50 кг/год), высокой себестоимостью и монопольным производством. Промышленное производство тонких вакуумплотных бериллиевых окон в России пока ещё отсутствует, и поэтому Россия импортирует ~400 г/год бериллиевой фольги толщиной 20 мкм по цене 10 тысяч \$/г. Потребление такой фольги рассеяно по научным центрам, вузам и приборостроению.

ПОРИСТЫЙ БЕРИЛЛИЙ В КЕРАМИЧЕСКОМ БРИДЕРНОМ БЛАНКЕТЕ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ИТЭР

В разрабатываемых в настоящее время в России конструкциях экспериментальных бридерных модулей бланкетов ИТЭР и ДЕМО предполагается использование пористого (пористость 20—30%) бериллия как отражателя и размножителя нейтронов. При этом для обеспечения выхода радиогенных газов пористость должна быть гарантированно открытой. Одним из возможных способов получения такого материала является разработанный в ОАО «ВНИИНМ» способ получения пористого бериллия с использованием нанокристаллического бериллия (нано-Ве) [14—16].

Способ заключается в термообработке предварительно спрессованной смеси порошков металлического бериллия и гидрида бериллия ВеН₂. В результате термоллиза ВеН₂ при температуре 250 °С образуется нано-Ве в виде микроячейистой структуры, играющий роль связки между более крупными частицами порошка металлического бериллия, а выделяющийся водород обеспечивает формирование открытой пористости.

Предложенный способ позволяет получать изделия с полностью открытой регулируемой пористостью и с минимальной разноплотностью. Изменяя параметры процесса (температуру и давление прессования), можно регулировать общую пористость материала. Структура материала сформирована из отдельных частиц Ве-порошка, а межчастичное пространство заполнено нанобериллием, имеющим микроячейистую структуру со средним размером ячеек 1,26 мкм. Толщина стенок микроячеек составляет ~100—300 нм. Материал имеет полностью открытую пористость, и её характер не зависит от содержания нано-Ве в пределах от 8,21 до 3,28% масс. Последнее обстоятельство весьма существенно с экономической точки зрения, поскольку позволяет снизить расход дорогого гидрида бериллия при получении пористого бериллия. Кроме того, бериллий с пористостью 10,2—34,0%, содержащий от 3,28 до 8,21% нано-Ве, имеет предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ от 74,3 до 379,4 МПа, что достаточно для практического применения. Прочность при сжатии линейно зависит от пористости и практически не зависит от содержания нано-Ве.

ВЫВОДЫ

На базе феноменологической модели прочности и термопрочности поликристаллического бериллия разработана технология получения термопрочного металла различного назначения с заданным уровнем механических свойств, отвечающего требованиям к свойствам материалов для термоядерных реакторов (первая стенка ИТЭР, бридерный бланкет ДЕМО и др.).

В обеспечение требований ИТЭР успешно завершены международные квалификационные испытания полученного бериллия, завершается подготовка к промышленному производству облицовочных бериллиевых пластин (ФГУП «Базальт»).

Разработана и опробована в лабораторных условиях технология получения пористого бериллия — перспективного и востребованного материала для использования в бридерных бланкетах термоядерных реакторов.

Разработаны основы технологии получения тонких вакуумплотных фольг из нанобериллия для приборостроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Папиров И.И., Тихинский Г.Ф.** Физическое металловедение бериллия. — М.: Атомиздат, 1968. 452 с.
2. **Бериллий.** Наука и технология. Пер. с англ. — М.: Metallurgy, 1984. 624 с.
3. **Владимиров В.И.** Физическая природа разрушения металлов. — М.: Metallurgy, 1984. 225 с.
4. **Тузов Ю.В., Хомутов А.М.** Механизмы релаксации остаточных термических микронапряжений в бериллии. — Цветные металлы, 2009, № 12, с. 79—82.
5. **Тузов Ю.В., Хомутов А.М.** Разработка обобщающего критерия работоспособности изделий из бериллия. — Цветные металлы, 2010, № 9, с. 76—78.
6. **Watson R.D., Youchison D.L., Dombrowski D.E., Guiniatulin R.N., Kupriyanov I.B.** Low cycle thermal fatigue testing of beryllium grades for ITER PFC. — In: Proc. 2nd IEA Intern. Workshop on Be Technology for Fusion. Wyoming, Sept. 6—8, 1995, p. 7—38.
7. **Rodig M., Duve R., Gervash A., Khomutov A., Linke J., Schuster A.** Thermal shock tests with beryllium coupons in the electron beam facility JUDITH. — Ibid., p. 39—57.
8. **Тузов Ю.В., Краснощекоев Е.С., Маркушкин Ю.Е.** Бериллий — состояние проблемы, возможности и перспективы. — В сб.: Всероссийская научно-техническая конференция «Материалы ядерной техники» (МАЯТ-2010). Туапсе, Краснодарский край, 26 сентября — 2 октября 2010. Тезисы докладов. — М.: ОАО «ВНИИНМ», 2010, с. 13.
9. **Ажажа В.М., Бабун А.В., Ковтун К.В., Санін Ф.П., Санін А.Ф., Хуторний В.С.** Берилій — конструктивний матеріал аерокосмічної техніки. — Дніпропетровськ: АРТ-ПРЕС, 2005. 263 с.
10. **Марченко С.В., Петрунин В.Ф., Маркушкин Ю.Е., Сенин М.Д., Чирин Н.А.** Нейтроннографическое изучение аморфного гидрида бериллия. — Физика твердого тела, 1982, т. 24, № 8, с. 2305—2309.
11. **Сенин М.Д., Ахачинский В.В., Маркушкин Ю.Е., Чирин Н.А., Копытин Л.М., Михаленко И.П., Ермолаев Н.М., Забродин А.В.** Получение, структура и свойства гидрида бериллия. — Известия АН СССР. Серия «Неорганические материалы», 1993, т. 29, № 12, с. 1582—1586.
12. **Горлевский В.В., Костылев Ф.А., Старшина В.Г., Сенин М.Д., Голиков И.В., Кондратьев М.В., Чубакова Т.А.** Получение и свойства высокопористого бериллия с микроячейистой структурой. — Там же, 1995, т. 31, № 4, с. 479—482.
13. **Gorlevsky V.V., Markoushkin I.E., Petrunin V.F.** Ultradispersed (nanostructured) beryllium. — In: Proc. of the 12th Target Fabrication Specialist Meeting. Jackson Hole, Wyoming, US, April 19—23, 1998, p. 209—214.
14. **Маркушкин Ю.Е., Петрунин В.Ф.** Ультрадисперсный (наноструктурированный) бериллий. — В сб.: V Всероссийская конференция «Физико-химия ультрадисперсных систем». Обнинск, 29 июня — 3 июля 1998 г. — М.: МИФИ, 2000, с. 220.
15. **Горлевский В.В., Маркушкин Ю.Е., Петрунин В.Ф.** — J. Moscow Phys. Soc., 1998, № 8, p. 373—376.
16. **Маркушкин Ю.Е., Горлевский В.В., Солонин М.И., Давыдов Д.А., Горохов В.А., Николаев Г.Н.** — J. Nuclear Materials, 2000, vol. 283—287, p. 1409—1413.
17. **Маркушкин Ю.Е., Солонин М.И., Горлевский В.В., Горохов В.А., Давыдов Д.А., Николаев Г.Н.** Способ получения изделий из пористого бериллия. Патент России № 2106931, 1998, МКИ В 22 F 3/14. Заявка № 96124796/2 от 31 декабря 1996 г.

Статья поступила в редакцию 17 марта 2011 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2011, вып. 2, с. 21—27.