

## БЕРИЛЛИЙ – МАТЕРИАЛ ЯДЕРНОЙ И ТЕРМОЯДЕРНОЙ ТЕХНИКИ

**Ю.В. Тузов, В.А. Горохов, Я.Д. Пахомов, В.Н. Пронин**  
**ОАО ИФТП, г. Дубна Московской области, Россия**

Представлен обобщенный анализ истории исследований в области материаловедения и технологии бериллия. Рассмотрены два основополагающих подхода к решению проблемы создания конструкционного материала из хрупкого по своей природе металла.

Ставшая классической мысль А.А. Бочвара о том, что структура в не меньшей степени определяет свойства металла или сплава, чем состав, великолепно иллюстрируется на примере развития материаловедения бериллия – самого легкого из тугоплавких и самого тугоплавкого из легких металлов. С точки зрения строения кристаллической решетки и уникальности физико-механических свойств, бериллий без преувеличения можно отнести к категории парадоксальных металлов. Он имеет выдающиеся ядерные свойства, а также высокие электро- и теплопроводность, жаростойкость, температуры плавления и кипения, коррозионную стойкость, размерную и конфигурационную стабильности. По удельным значениям жесткости, прочности и теплоемкости он превосходит все другие материалы, а по плотности – сравним с самыми легкими магниевыми сплавами.

Применение бериллия в технике непрерывно расширяется, несмотря на ряд недостатков – хладноломкость, токсичность и высокую стоимость. Это объясняется большими техническими преимуществами, а в ряде случаев и экономической выгодой замены бериллием традиционных материалов атомной и термоядерной техники.

По существу вся история бериллия от первых попыток его конструкционного применения в 50-х годах вплоть до начала 70-х сводится к борьбе с низкотемпературной хрупкостью. При этом зависимость относительного удлинения поликристаллического бериллия от температуры (максимум при 400...450 °С) указывает на возможность обработки давлением со значительными деформациями.

Обобщенный анализ истории отечественных и зарубежных исследований в области материаловедения и технологии бериллия позволяет выделить два основополагающих подхода к решению проблемы создания конструкционного материала из хрупкого по своей природе металла. Каждый из этих подходов направлен на создание оптимальной, с точки зрения исследователей, структуры, а различие заключается в расстановке акцентов в цепочке *состав* → *структура* → *свойство*. Следует заметить, что критерии

оптимальности структуры у разных групп исследователей не совпадали.

Первый подход, активно развивавшийся Харьковской школой металлофизиков (В.Е. Иванов, А.И. Гиндин, Г.Ф. Тихинский, И.И. Папиров и др.), исходит из предпосылки о преобладающем значении состава и поэтому ориентирован на получение максимально чистого металла. Этот подход базируется на результатах изучения фундаментальных свойств кристаллической решетки бериллия, систем скольжения и разрушения высокочистых бериллиевых моно- и поликристаллов. Именно благодаря изучению сверхчистого металла были установлены основополагающие закономерности пластической деформации и разрушения, обнаружено и исследовано явление сверхпластичности (!) бериллия, разработаны технологические процессы получения тонких вакуум-плотных фольг. В ходе всесторонних исследований выяснилось, что низкотемпературная хрупкость бериллия определяется особенностями его электронной структуры (наличие ковалентной составляющей) и поэтому принципиально не может быть устранена. В то же время эти результаты научных исследований ХФТИ в рамках указанного подхода легли в основу фундаментальных представлений о природе хрупкости и составили приоритет отечественной металлофизики бериллия, признанный мировой наукой в 60–70-х годах.

Однако в последующем, в процессе попыток воспроизведения достигнутых результатов на укрупненных количествах металла, стало очевидным, что использование литейной технологии для получения изделий из бериллия является неприемлемым. Это было обусловлено трудностями, связанными с получением высокочистого металла в промышленных масштабах, особенностями его кристаллизации, большой трудоемкостью процессов последующего измельчения зерна путем термомеханической обработки и обеспечения приемлемой изотропности свойств. В частности, основная сложность заключалась в реализации кратковременных (несколько минут) высокотемпературных отжигов для массивных изделий. Иными словами, в рамках

этого подхода невозможно было создать стабильную структуру, обеспечивающую достижение оптимальных свойств, в условиях промышленного производства.

Весь прогресс в области повышения механических свойств конструкционного бериллия обязан развитию порошковой технологии. В сферу научных интересов и ответственности А.А. Бочвара бериллий попал в 1953 году, когда приказом министра в НИИ-9 была образована (переведена из ГИРЕДМЕТ) лаборатория порошковой металлургии №21 во главе с профессором Г.А. Меерсоном. В её задачи входила разработка технологии и создание производства бериллия для замедлителей и отражателей, разрабатываемых в то время исследовательских и экспериментальных реакторов. Первоначально существовали и параллельно развивались три технологии получения исходного металлического бериллия – так называемые карбидная, хлоридная и фторидная. Технология разложения карбида бериллия оказалась тупиковой из-за ее дороговизны и опасности для здоровья. Практически по тем же причинам в конце 50-х годов не получила развитие и хлоридная технология, хотя хлоридный металл получался весьма чистым и не требовал дополнительной очистки. В итоге осталась и получила дальнейшее развитие технология восстановления фторида бериллия магнием. Этот металл было необходимо очищать от примесей, так как по коэффициенту захвата нейтронов содержащимися в металле тяжелыми элементами он не годился для ядерных применений. Первые результаты исследований в этом направлении были получены и представлены сначала в виде доклада на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии в Женеве уже в 1955 году [1], а затем в более подробном виде опубликованы в журнале «Атомная энергия» в 1958 году [2].

Для очистки фторидного магнетермического бериллия благодаря усилиям в основном ученых ХФТИ был разработан процесс вакуумной дистилляции. С использованием этого процесса в 1955 году на базе Подольского опытного завода (ПОЗ) силами ученых ВНИИНМ была создана первая промышленная технология получения изделий из бериллия методом порошковой металлургии – организован выпуск горяче-прессованных заготовок диаметром до 110 мм из порошков крупностью менее 600 мкм. Из них методом механической обработки были изготовлены первые специзделия и блоки замедлителей атомных реакторов. Нельзя не отметить, что на этом этапе все научные исследования в области металловедения порошкового бериллия всего лишь сопутствовали технологическим разработкам, базировавшимся на эмпирическом подходе. Это диктовалось необходимостью быстрее решения проблем, связанных с обороноспособностью страны.

В начале 60-х годов эта технология была перенесена на Ульбинский металлургический завод в г. Усть-Каменогорске (Казахстан), где на вновь

созданной базе было организовано производство металлического бериллия, бериллиевых лигатур и изделий из оксида бериллия. К этому времени сформировались три основные области использования бериллия, а именно: ядерный оружейный комплекс (1), атомные реакторы (2) и авиакосмическая техника (3). В последние годы появилась ещё одна область – термоядерная энергетика, где бериллий используется в качестве защитной облицовки внутренней поверхности вакуумной камеры. В каждой из этих областей к бериллию предъявляются свои специфические требования, и поэтому возникли задачи разработки специальных сортов бериллия в зависимости от их назначения.

На этом этапе впервые для порошкового бериллия промышленной чистоты были поставлены материаловедческие задачи по установлению связей между структурой и свойствами. К металловедческим исследованиям были привлечены такие крупные специалисты-металловеды, как А.С. Займовский, Н.Т. Чеботарев – из ВНИИНМ, Н.Н. Давиденков, Л.М. Шестопалов – из Ленинградского физико-технического института, Д.М. Скоров - из МИФИ. Необходимо было выявить, понять природу и классифицировать элементы структуры порошкового бериллия, контролируемые то или иное свойство, и найти эффективные технологические приемы создания необходимой структуры.

Исследования порошкового металла, выполненные в ВНИИНМ им. академика А.А. Бочвара, легли в основу второго, инженерного, подхода к проблеме хрупкости. Собственно хрупкость бериллия, обусловленная особенностями кристаллической решетки, в рамках принятого и развитого впоследствии подхода, рассматривалась как некое ограничение, а не как доминирующий фактор. При этом пластичность поликристаллического бериллия при деформации в процессах обработки давлением принималась как функция напряженно-деформированного состояния и таких характеристик структуры, как величина частиц исходного порошка, содержания примесей, состояния границ.

С учетом особенностей кристаллической решетки бериллия, механизмов деформации и разрушения при комнатной температуре было сформировано отношение к бериллию, как конструкционному материалу. Различным видам внешних нагрузок на изделие должен соответствовать определенный тип структуры. Это достигается целенаправленным выбором способов и режимов компактирования и деформации. Следовательно, эксплуатационные характеристики изделий из бериллия, такие как прочность, пластичность, сопротивление микропластическим деформациям и др., будут определяться преимущественно текстурой, величиной зерна, количеством и характером распределения вторых фаз и пор, уровнем микронапряжений. Иными словами, в зависимости от условий работы изделий из бериллия выбирался и рекомендовался

соответствующий тип структуры, характеристики которой зависели от технологических факторов. При этом все основные закономерности в связях структуры и комплекса механических свойств изучались на порошковом металле технической чистоты.

Единственным существенным фактором, отличающим структуру порошкового бериллия от структуры литого, является наличие включений оксида бериллия на границах зерен в количестве до нескольких весовых процентов, что позволяет производить горячую деформацию и высокотемпературные обработки, не опасаясь катастрофического роста зерен и связанного с этим снижения механических свойств. В этой связи порошковый бериллий можно рассматривать как дисперсионно-упрочненный сплав, в котором оксид является упрочняющей фазой. Вполне естественно, что основное внимание исследователей уделялось изучению различных аспектов влияния оксидных включений как на механизм горячей деформации, так и на физико-механические свойства полуфабрикатов и изделий. Суть проблемы сводилась к решению двух задач.

1. В теоретическом (исследовательском) плане – к поиску закономерностей связи совокупности структурных факторов с предысторией порошкового материала.

2. В практическом (технологическом) плане – к разработке технологических приемов, позволяющих получать бериллиевые изделия с необходимым сочетанием физико-механических свойств для различных применений.

Систематизация и обобщение многолетних исследований и разработок по этим двум направлениям, выполненные во ВНИИНМ, позволили сформулировать новые представления о механизмах формирования структуры на стадиях получения порошков, их компактирования и последующей высокотемпературной деформации порошкового бериллия промышленной чистоты. Выявленные при этом закономерности дали возможность объединить в одну целостную концепцию многие казавшиеся ранее противоречивыми представления о прочности и пластичности порошкового бериллия [3].

Исходной предпосылкой являлось устоявшееся представление о том, что поведение любого металла под нагрузкой определяется напряжениями течения и разрушения монокристалла с учетом особенностей трансляции скольжения через границы зерен. С этой точки зрения бериллий не представлял исключения.

Однако оказалось, что в поликристаллическом бериллии ведущую роль играют необычные сочетания его физических свойств, не присущие либо являющиеся второстепенными для большинства других металлов. Одним из таких свойств является анизотропия коэффициента термического линейного расширения (КТЛР) бериллия вдоль и поперек гексагональной оси, которая в сочетании с высокими упругими модулями и температурой плавления, является причиной больших остаточных термических

микронапряжений (О.Т.М.) в поликристаллическом металле. В результате каждое зерно оказывается сжатым вдоль гексагональной оси и растянуто в перпендикулярных направлениях. В порошковом бериллии значительные термические напряжения также возникают и на границах раздела между включениями оксида и матрицей, так как их КТЛР отличаются в два раза. Сжимающие напряжения блокируют возможность зарождения разрушения по плоскостям базиса до тех пор, пока напряжения от внешних нагрузок не превысят их величину. Поскольку базисный скол является для бериллия основным механизмом разрушения, то ясно, что с ростом величины О.Т.М. прочность должна возрастать. Существование такой зависимости было подтверждено экспериментально. Кроме того, оказалось, что величина О.Т.М. в первую очередь зависит от количества и степени дисперсности оксидных включений, которые, препятствуя релаксации О.Т.М. за счет зернограничного проскальзывания, объективно приводят к их росту.

Такой новый подход к проблеме прочности и пластичности порошкового бериллия позволил интерпретировать свойства бериллия с учетом его природной специфики. В рамках данного подхода было установлено особое значение остаточных термических микронапряжений, как структурного фактора, ранее не принимаемого во внимание, но существенным образом влияющего на механические свойства металла.

В рамках существующих технологических процессов порошковой металлургии и обработки давлением величина О.Т.М., в принципе, поддается выбору способов получения порошков и режимов их компактирования, температурой и видом деформации. В существенно меньшей степени величина О.Т.М. зависит от химической чистоты металла в пределах одного сорта. То есть оказалось, что **структура**, формирующаяся под воздействием перечисленных технологических факторов, **в доминирующей степени обеспечивает достижение требуемых свойств** в зависимости от конкретного применения бериллия как конструкционного материала.

Учитывая разработанный подход, в рамках созданной концепции удастся классифицировать все используемые для различных областей применения сорта бериллия и обоснованно выбрать соответствующие технологические процессы изготовления изделий.

Для обеспечения высокой чувствительности и точности навигационных систем были разработаны приборные сорта бериллия, получаемые методами горячего и изостатического прессования. Изготовленные из них гироскопы позволили повысить точность системы на порядок, существенно сократить время готовности и увеличить гарантийный ресурс системы.

Для изготовления спутниковых систем наблюдения были созданы оптические сорта бериллия, получаемые методом горячей штамповки порошков.

Методом горячего изостатического прессования тонких (менее 30 мкм) порошков бериллия с повышенным содержанием кислорода был получен не имеющий зарубежных аналогов материал с выдающейся радиационной стойкостью при температурах до 700 °С.

Специальные термопрочные сорта были разработаны и использованы для изготовления тормозных колодок для летательных аппаратов методом горячейковки. Это позволило снизить массу тормозов в 2-2,5 раза (для космического челнока «Буран» экономия в весе составила ~400 кг).

Еще более высокая термопрочность требуется для бериллия, идущего на облицовку первой стенки экспериментального термоядерного реактора ИТЭР. Эта задача также была успешно решена, соответствующий сорт металла выдержал необходимые испытания и принят в качестве кандидатного материала для изготовления пластин защиты первой стенки.

Отдельно следует выделить исследования и разработки процесса изотермической штамповки порошкового бериллия технической чистоты, основанного на механизме сверхпластического течения металла по границам зерен. Этот механизм деформации был открыт А.А. Бочваром на цинковом сплаве в 1938 году. Техническая реализация этого процесса, разработанного в ВНИИНМ, завершила долгий, но удивительно

интересный путь укрощения строптивого природного характера бериллия.

Все эти примеры использования бериллия в различных областях техники говорят о справедливости суждения академика А.А. Бочвара о роли структуры. Плодотворность подхода, основанного на этом суждении, подтверждена тем обстоятельством, что хрупкий по своей природе бериллий по сути переведен в разряд типичных конструкционных металлов и относится к числу выдающихся материалов XXI века.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г.А. Меерсон, Г.Е. Каплан, Г.Ф. Силина, Д.Д. Соколов. *Исследования в области геологии, химии и металлургии: Доклад советской делегации на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии, Женева, 1955.*

2. Г.А. Меерсон, Д.Д. Соколов, Н.Ф. Миронов, Н.М. Богорад, Я.Д. Пахомов, Д.С. Львовский, Е.С. Иванов, В.М. Шмелев. *Бериллий // Атомная энергия. 1958, т.5, в. 6, с.624-630.*

3. A.M. Khomutov, V.S. Mikhailov, V.N. Pronin and Ya.D. Pakhomov. *Inherent structure features of beryllium and their influence on the performance of polycrystalline metal under different conditions // Proc. of the 3<sup>rd</sup> IAEA International workshop on beryllium technology for fusion. Oct 22-24, 1997, Mito city, Japan.*

*Статья поступила в редакцию 10.09.2008 г.*

## БЕРИЛІЙ – МАТЕРІАЛ ЯДЕРНОЇ І ТЕРМОЯДЕРНОЇ ТЕХНІКИ

*Ю.В. Тузов, В.А. Горохов, Я.Д. Пахомов, В.Н. Пронін*

Наведено узагальнений аналіз історії досліджень у галузі матеріалознавства і технології берилію. Розглянуто два основоположних підходи до вирішення проблеми створення конструкційного матеріалу із крихкого за своєю природою матеріалу.

## BERILLIUM – MATERIAL OF NUCLEAR AND FUSION TECHNIQUE

*Yu.V. Tuzov, V.A. Gorokhov, Ya.D. Pakhomov, V.N. Pronin*

General analysis of history of investigation in the field of material science and technology of beryllium is presented. Two basic approaches to the problem of development of structural material produced from brittle material are examined.