

ЧЕРНОВСКАЯ МЕМОРИАЛЬНАЯ ЛЕКЦИЯ

УДК 621.039

М. И. СОЛОНИН

Бочвар А. А. и его школы общего и радиационного материаловедения

Михаил Иванович СОЛОНИН,
член-корреспондент РАН, 1-й
Заместитель министра РФ по
атомной энергии

Уважаемые коллеги и гости!

Мне оказана высокая честь сделать доклад о значении научных трудов для отечественной атомной отрасли великого ученого-металловеда, дважды Героя Социалистического труда, лауреата Ленинской и четырех Сталинских премий* академика Андрея Анатольевича Бочвара.

Я особенно ценю это почетное предложение, поскольку вся моя научная деятельность прошла в стенах ВНИИ неорганических материалов, научные школы и традиции которого были заложены А. А. Бочваром и имя которого теперь носит институт.

Ученые старшего поколения, воспитанные на многократно издававшихся монографиях по материаловедению, металлообработке и других трудах

А. А. Бочвара, хорошо знают о том выдающимся вкладе, который он внес в дело превращения отвлеченной и созерцательной науки, какой была в начале прошлого века наука о металлах, в теоретическое и практическое материаловедение, позволившее совершить революционный переворот в технологиях получения материалов в первой половине XX в. В 30-е и 40-е годы он стал воистину ученым мирового масштаба. Его имя заслуженно ставили в один ряд с известными учеными России в области металлургии и химии металлов - Д. К. Черновым, Н. С. Курнаковым, А. А. Байковым.

Позднее, во второй половине прошлого века его имя все реже и реже стало звучать в научном мире и появляться на страницах научных журналов. Скепти-

кам могло показаться, что ученый решил "почивать на лаврах". Однако даже непосвященному ясно, что звание Героя и многочисленные высшие награды страны, полученные им во второй, послевоенный период научной деятельности, свидетельствует о продолжении интенсивной исследовательской работы. И на этом втором, мало известном периоде деятельности академика А. (А.) Бочвара я хотел бы подробнее остановиться в своем докладе.

Коренным событием, изменившим научный и жизненный путь Андрея Анатольевича, явилось его направление в 1946 г. в качестве консультанта в Институт спецметаллов. Уже с 1952 г. он возглавляет институт, оставаясь его бессменным директором до своей кончины в 1984 г. Сейчас Институт спецметаллов - это Ордена Ленина Всероссийский научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А. А. Бочвара.

В 1947 г. А. А. Бочвару в соответствии с решением Правительства было поручено возглавить работы, связанные с получением металлического урана и плутония, и исследование их свойств в связи с разработкой первой советской атомной бомбы.

Выбор именно А. А. Бочвара среди десяти ведущих металлургов и металлоспециалистов - теоретиков и практиков - был не случайным, поскольку к тому времени Андрей Анатольевич был лучшим представителем тех и других одновременно.

Но сначала немного истории.

В начале 30-х гг. А. А. Бочвар буквально ворвался в мир науки о металлах, став в 29 лет профессором. В 33 года он блестяще защитил докторскую диссертацию, которая впервые в истории науки соединила воедино теоретическое и практическое материаловедение легких сплавов.

В эти же годы молодой профессор А. А. Бочвар приглашается в Московский институт цветных металлов и золота имени М. И. Калинина на должность заведующего кафедрой "Материаловедение" (рис. 1).

Одной из первых и оригинальных работ выпускника Московского Высшего технического училища, инженера-технолога А. А. Бочвара была статья "За -

* С 1966 г. Государственная премия СССР.

• Ныне Московский государственный институт стали и сплавов (технологический университет).

Рис. 1. Коллектив кафедры металлургии. Профессор А. А. Бочвар третий справа в первом ряду

зависимость минимальной температуры рекристаллизации от основных характеристических величин твердого вещества", опубликованная в 1927 г. В этой статье он увековечил свое имя, сформулировав то, что было позже названо "правилом Бочвара". Для чистых металлов оно звучало так: "Температура рекристаллизации есть такая же периодическая функция атомного веса, как и температура плавления, причем кривые, выражающие изменение температуры рекристаллизации и плавления в зависимости от атомного веса (или атомного номера), пойдут все время параллельно друг другу".

В этой же работе были высказаны определенные соображения о причинах, повышающих температуру рекристаллизации металлов, которые были в дальнейшем развиты применительно к рекристаллизации сплавов и легли в основу созданной А. А. Бочваром теории жаропрочности металлов.

Анализируя труды А. А. Бочвара по металлургии, поражаешься широтой его научной мысли, стремлением найти место изучаемому процессу в общей совокупности явлений, наблюдаемых не только в металлах, но и в природе в целом.

Так, в предисловии к монографии "Исследование механизма и кинетики кристаллизации сплавов эвтектического типа" (1935 г.) А. А. Бочвар писал: "Наши учителя: Талмун, Курнаков, Байков постоянно учат не заглядывать в узкие рамки изучения только одного непосредственно интересующего нас объекта".

Это положение А. А. Бочвар блестяще реализовал при исследовании в 30-х гг. механизма кристаллизации сплавов. Помимо самих сплавов, он исследовал процессы кристаллизации органических веществ и подтвердил основные выводы на примере структур магматических пород.

Другое исследование, принесшее мировую славу А. А. Бочвару, - изучение механизма сверхпластичности сплавов. Явление сверхпластичности было исследовано не само по себе, а в контексте теоретических представлений и экспериментальных данных о деформации сплавов вообще.

Рис. 2. А. А. Бочвар (второй слева в первом ряду) с коллективом авиационного завода. 1930 г.

Вот что писал Андрей Анатольевич в своей статье "О разных механизмах пластичности в металлических сплавах" (1948 г.): "... мы приходим к заключению о необходимости привлечения к объяснению всей совокупности сложных явлений пластической деформирования по крайней мере четырех разных механизмов течения: 1) сдвигового или дислокационного; 2) аллорфно-диффузионного; 3) межфазового перемещения через растворение и осаждение; 4) межзеренного перемещения при наличии рекристаллизации". Последние два механизма впервые были предложены А. А. Бочваром для объяснения эффекта сверхпластичности сплавов и блестяще подтверждены практически.

Другой отличительной чертой А. А. Бочвара-ученого является непреходящий анализ значения приобретенных новых знаний для практического металлургии. Для него получение экспериментальных данных, их анализ и построение теории явления, практическое воплощение теории в технологиях и их промышленное внедрение были неразрывными этапами одного процесса. "Основной результат научных исследований только тогда результат, когда он понят на заводе", - так трактовал задачи науки А. А. Бочвар (рис. 2).

Вот интересная фраза, произнесенная им на лекции по сверхпластичности (1969 г.): "Уравнения, несмотря на все их несовершенство, нужны потому, что они должны нам дать возможность предсказывать, а это нам нужно для дальнейших промышленных исследований". А. А. Бочвара как технолога лучше всего характеризуют его собственные слова: "... отклонения от общих законов, хотя и разочаровывают несколько начинающего металлурга, что суживают область однозначного решения вопросов контроля при помощи диаграмм состояния и микроструктуры, дают нам в руки мощное оружие, посредством которого можно влиять на процессы, происходящие в сплавах, и тем самым искусственно изменять их строение и свойства" (1935 г.).

Этот принцип был реализован А. А. Бочваром на практике при создании легких сплавов на основе алюминия и магния для авиационной промышленности и технологии фасонного литья с кристаллиза-

В 1946 г. на первых после войны выборах в Академию Наук А. А. Бочвара избирают ее действительным членом.

Оглядываясь на первый период деятельности А. А. Бочвара, на неукоснительное выполнение им своего кредо - от теории к технологиям и промышленности - нельзя не прийти к выводу, что кандидатуры, альтернативной ему в таком вопросе, как научное руководство созданием урановых и плутониевых компонент первых образцов советского атомного оружия, не было.

Новым полем деятельности для А. А. Бочвара стало физическое и, если так можно выразиться, практическое металловедение урана и плутония - ядерных компонент атомного оружия, а несколько позже ---: конструкционных и делящихся металлов и сплавов для атомной энергетики.

В связи с новыми задачами существенно расширился перечень металлов, сплавы которых были исследованы под научным руководством А. А. Бочвара (рис. 3).

Однако прежде чем изучить плутоний, необходимо было его получить, поскольку в природе он не встречался.

Ничтожное количество плутония было накоплено в лаборатории № 2 АН СССР (ныне Российский научный центр "Курчатовский институт") в урановых блоках, облученных в реакторе Ф-1.

Предстояло совершить практически невозможное: выделить элемент с неизвестными физико-химическими свойствами, содержащийся в облученном уране в концентрации один атом плутония на миллион атомов урана, и получить его в металлическом виде. При этом требования по чистоте продукта превосходили даже современные требования по чистоте полупроводниковых материалов.

Эта задача была блестяще выполнена коллективами химиков и металлургов Института спецметаллов (как уже отмечалось, ныне это ВНИИНМ имени академика А. А. Бочвара). Были получены первые миллиграммы металлического плутония.

Металлические плутоний и уран, как оказалось, помимо радиоактивности обладали и другими свойствами, затрудняющими работу с ними, прежде всего это быстрое окисление на воздухе, которое в некоторых случаях приводило к возгоранию материала.

Вдобавок к этому у плутония было обнаружено шесть аллотропических модификаций в интервале температур от комнатной до относительно низкой температуры плавления ~ 640 °С, что на первых порах вызвало растерянность у металлургов. Абсолютная хрупкость и сильная анизотропия свойств стабильной при комнатной температуре модификации плутония исключали возможность изготовления изделий из него привычными методами обработки металлов.

0 30 40 50 60 70 80 90 100
Содержание И, вес. %

Рис. 4. Диаграмма состояния Рn - U, как она была представлена на Второй Женевской конференции (III в 1958 г.

Встала задача поиска легирующих элементов и технологий, позволяющих улучшить свойства металлических урана и плутония.

В кратчайшие сроки были исследованы сотни сплавов урана и плутония, получены десятки двойных и тройных диаграмм состояния. Очевидно, что никакому отдельному ученому был не под силу такой титанический труд. Здесь ярко проявился талант А. А. Бочвара как организатора науки, вокруг которого сплотились замечательные соратники - ученые и ученики: И. И. Черняев, А. Н. Вольский, А. С. Займовский, С. Т. Конобеевский, В. И. Кутайцев, Н. Т. Чеботарев.

Началась история отечественной школы металловедения урана и плутония.

Можно только восхищаться искусством исследователей, работавших с миллиграммовыми образцами и сумевших разобраться в чрезвычайно сложных диаграммах состояния. Удивление вызывает и то, как удалось получить сплавы плутония с тугоплавкими металлами при различии в температурах плавления компонентов в 1,5 - 2 тысячи градусов.

В своем докладе на Второй Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии в 1958 г. "Взаимодействие плутония с другими металлами в связи с их расположением в периодической системе Д. И. Менделеева" А. А. Бочвар подчеркнул: *"Характер взаимодействия плутония с другими элементами в значительной степени определяется его структурой и основными физико-механическими свойствами, существенно отличными от структуры и свойств обычных металлов"*.

В качестве яркого примера удивительных и уникальных свойств плутония, так же как и урана, можно привести диаграмму Рn - U, которая является одной из самых необычных и сложных двойных диаграмм (рис. 4).

Необычность этой системы заключается в существовании в центре диаграммы состояния очень большой области взаимной растворимости на базе кристаллической решетки (Р'), строение которой отличается от полиморфных модификаций как урана, так и плутония.

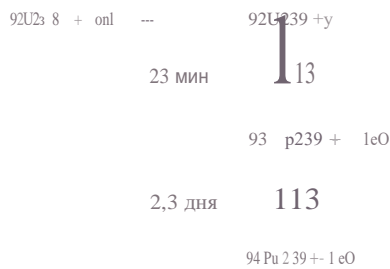


Рис. 6. Цепочка ядерных превращений урана в плутоний при облучении

Рис. 7. Приращение массы урана при облучении. Исходная масса образцов составляла 28 мг

таллическими свойствами, в материалах, применяемых для изготовления деталей ядерного оружия.

Принципиальным для этих сплавов является вопрос о том, насколько стабильна дельта-фаза в условиях длительного времени.

А. А. Бочваром с сотрудниками еще в 1949 г. был рассмотрен вариант диаграммы, где при относительно низких температурах обозначен эвтектидный распад дельта-фазы. Низкотемпературная часть диаграммы была построена теоретически на основе громадной научной интуиции и установленных А. А. Бочваром с коллегами основных особенностей физико-химического взаимодействия плутония с металлами, поскольку на практике фактов, свидетельствующих о распаде, не наблюдали.

Эвтектидный распад не был обозначен на диаграммах, разработанных в лабораториях США, Великобритании и Франции, согласно которым дельта-фаза плутония в определенном интервале содержания галлия являлась стабильной при комнатной температуре.

Для экспериментального подтверждения распада дельта-фазы был предложен нетрадиционный подход - воздействие давления или пластической деформации на образцы в сочетании с длительными отжигами. При этом предполагалось, что напряжения, возникающие при механической деформации, приводят к увеличению диффузионной подвижности галлия и ускорению процессов распада.

Несмотря на необычность метода, который вызвал определенное недоумение ряда ученых, он был поддержан А. А. Бочваром. В результате были получены неоспоримые доказательства в пользу советского варианта диаграммы состояния.

Однако после первого опубликования в 1975 г. советского варианта диаграммы Pu - Ga американцам понадобилось еще 25 лет, чтобы признать правильность Бочваровского варианта диаграммы (рис. 5).

Суммируя высказывания, сделанные в связи с этим ведущими американскими учеными докторами Хеккером и Хамеллом, обозреватель New York Times Вильям Брод в 2000 г. писал, что русские ученые обнаружили, что сплавы плутония, используемые в

Рис. 8. Разрушение экстремально теплового выделяющего элемента вследствие радиационного роста вследствие в дельту, "оторвал" загрузку "вышолз" из оболочки

оружии, более нестабильны, чем предполагалось ранее, и это может повлиять на боеспособность американского арсенала из 10000, или около того, ядерных боеголовок.

Так, исследования, проведенные А. А. Бочваром и его школой в далекие послевоенные годы, не потеряли актуальность и в наше время, причем в такой глобальной проблеме, как боеспособность ядерного оружия.

За работы по металлосведению плутония и урана, решение материаловедческих проблем второй советской атомной бомбы с использованием обогащенного урана и плутония А. А. Бочвару присуждается в 1951 г. третья Сталинская премия 1 степени.

Следующей задачей стало достижение ядерного паритета с США, что потребовало ускорение наработки плутония из урана при его нейтронном облучении в атомных реакторах.

Неожиданной проблемой стало необычное поведение урана при нейтронном облучении (рис. 6). Образцы урана самопроизвольно удлинялись под облучением вдоль определенного кристаллографического направления, сокращаясь по другому направлению, и увеличивались в объеме (рис. 7 и 8). Появились совсем необычные термины для металлосведения - "радиационный рост", "жеванность поверхности" и "распухание".

Поскольку эти явления отрицательно сказывались на поведении урановых элементов в реакторе, А. А. Бочвар сконцентрировал значительные научные силы для исследования и разработки методов борьбы с ними. Коллективы ученых возглавили С. Т. Конобеевский и Г. Я. Сергеев. Так начался пери-

решена. Технология обеспечила выход из строя всего одного элемента из миллиона, что значительно выше лучших показателей надежности, достигнутых для современных тепловыделяющих элементов других типов реакторов.

В истории промышленности является уникальным тот факт, что разработанная 50 лет назад технология была столь хорошо отработана и обеспечила столь высокие показатели надежности, что осталась без изменений и сейчас. Другим уникальным фактом является регулирование химического состава сплава урана на уровне сотых долей процента при объеме выпуска в тысячи и десятки тысяч тонн. Это потребовало сначала создания технологии получения сверхчистого урана и затем технологии его прецизионного легирования.

Не будет преувеличением сказать, что работы, выполненные под руководством А. А. Бочвара, А. С. Займовского и Г. Я. Сергеева, явились одним из высших достижений в истории мировой металлургии.

В 1960 г. А. А. Бочвару за решение этой проблемы, которую называли проблемой "живучести" стандартных блоков промышленных реакторов, была присуждена Ленинская премия.

После решения основных материаловедческих проблем атомного оружия академик А. А. Бочвар получает новое правительственное задание - разработать технологии получения высокочистого трития и изготовления урановых полусфер больших размеров для первого термоядерного заряда.

Руководимые им технологи столкнулись со многими проблемами. Главной проблемой, помимо интенсивного взаимодействия с воздухом уже при повышенных температурах, была сильная анизотропия свойств урана, которая во много раз превышала анизотропию других металлов. Это обстоятельство потребовало разработки новых технологий получения урановых заготовок с требуемой структурой, прокатки листов и глубокой вытяжки.

За решение этих задач А. А. Бочвар, как научный руководитель работ, был награжден в 1953 г. орденом Ленина, и ему была присуждена четвертая Сталинская премия I степени.

После успешного испытания первой в мире термоядерной бомбы в 1954 г. академику А. А. Бочвару вторично присвоено звание Героя Социалистического труда.

В начале 50-х гг. была поставлена поистине эпохальная задача: приступить к созданию отечественной атомной энергетики. Первый этап - создание первой атомной электростанции в г. Обнинске. Одной из ключевых проблем был выбор уранового сплава для ядерного топлива. Поскольку ожидалась значительно более высокая степень радиационного повреждения ядерного топлива, чем в урановых элементах, нарабатывающих плутоний, то предыдущий

1 2

Рис. 9. Фотографии образцов урана (1) и его сплава (2) после циклической термической обработки

од становления отечественной школы радиационного материаловедения.

Следуя своему принципу находить место данному явлению в общей системе знаний, для понимания явления радиационного роста урана А. А. Бочвар проанализировал имеющиеся данные о формоизменении металлов вообще, вплоть до, казалось бы, отвлеченной темы деформации стволор орудий, которой занимался Д. К. Чернов в начале XX в.

Анализ этих данных и выполненные под его руководством эксперименты позволили ему найти общность явления радиационного роста урана с одной стороны и формоизменения металлов (рис. 9) при циклической термической обработке с другой.

На Второй Женевской Международной конференции ООН по применению атомной энергии в мирных целях в своем докладе "Влияние циклических нагревов и охлаждений на размерную и структурную стабильность различных металлов и сплавов" А. А. Бочвар написал: *"При циклической термической обработке всех металлов и сплавов получают остаточные изгибы размеров, если параметры цикла имеют подходящие значения. Необходимыми условиями для возникновения существенных остаточных изменений размеров являются: наличие напряжений, хотя бы на одном из этапов цикла и достаточно высокая максимальная температура цикла. Напряжения, необходимые для создания остаточной деформации, могут быть вызваны, в частности, за счет локальных температурных всплесков, как, например, при процессах деления атомов"*.

Установленные А. А. Бочваром закономерности формоизменения металлов позволили при выборе методов борьбы с радиационным ростом урана перейти от широкомасштабных радиационных экспериментов к безопасным внереакторным исследованиям поведения сплавов урана при циклической термической обработке.

Задача по обеспечению надежности элементов за счет создания особой микроструктуры урана была

опыт по разработке сплавов урана не мог быть использован.

К этому времени проведенные под руководством А. А. Бочвара исследования в области радиационного материаловедения позволили установить основные закономерности и характер радиационных повреждений в сплавах урана. Итогом первых исследований, который стал обескураживающим для металлургов, был тот факт, что равновесные диаграммы состояния оказались неприменимы в условиях облучения.

Не менее обескураживающим был и тот факт, что диаграммы состояния, равновесные в условиях облучения, не подчиняются правилу фаз (рис. 10). Например, в бинарных системах однофазная область могла граничить с трехфазной областью.

Кроме этого, было установлено, что под облучением помимо сильной "деформации" фазовых областей возникают новые фазы; некоторые сплавы переходят в аморфное состояние.

Для ядерного топлива атомной электростанции А. А. Бочваром был предложен сплав U - 9 % Мо в метастабильном гамма-состоянии, которое, как оказалось, является совершенно стабильным при нейтронном облучении в реакторе.

В 1954 г. в г. Обнинске Калужской области была пущена Первая в мире атомная электростанция. Топливный сплав U - 9 % Мо был также использован в реакторах с ядерным перегревом пара Белоярской АЭС и АТЭЦ в г. Билибино.

А. А. Бочвар является научным руководителем работ по созданию тепловыделяющих элементов для транспортных ядерных энергетических установок, и им было сказано решающее слово при разработке ядерного топлива для первой отечественной атомной подводной лодки и первого в мире атомного ледокола "Ленин".

За заслуги в области использования мирного атома, создание и внедрение в промышленность топливных и конструкционных материалов для различных типов реакторов А. А. Бочвару в 1962 г. присвоено звание "Заслуженный деятель науки и техники РСФСР".

Всего под научным руководством А. А. Бочвара было решено более двадцати крупных материаловедческих проблем, ход выполнения которых стоял на контроле Правительства и Политбюро. Все они были успешно выполнены с неизменно положительным результатом и точно в срок, а их научный руководитель награжден многими орденами и медалями страны.

Среди решенных под его руководством задач были: создание топлива и конструкций тепловыделяющих элементов для реакторов атомных электростанций различных типов, топлива на основе карбидов урана для первого космического ядерного реактора, создание энергетических блоков на основе полония

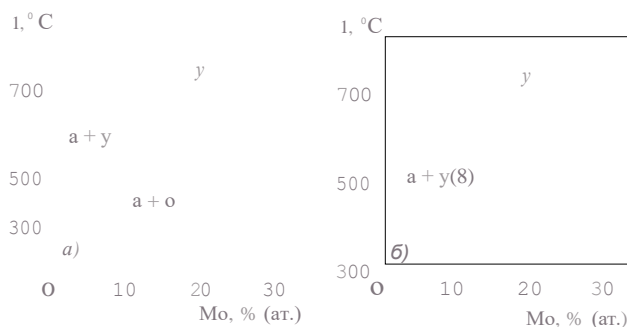


Рис. 10. Равновесные диаграммы системы СОСII/OЯШЯ СIIСII/e.ИИЫ U - Мо в 01111су111с111е11и и облучения (а) и под облучением в реакторе (б)

для "Лунохода", разработка технологии бериллия и гидридов металлов.

Приведу несколько примеров, характеризующих А. А. Бочвара как ученого и организатора науки.

По воспоминаниям одного из учеников А. А. Бочвара, в середине 50-х гг., когда обсуждался вопрос о выборе типа ядерного топлива для быстрого реактора БР-5, Андрей Анатольевич сказал: "Надежную и безопасную работу неизвестных ядерных установок можно обеспечить, применяя только абсолютно совместимые радиационно-стойкие материалы".

Выбор был сделан в пользу диоксида плутония. Металлическое топливо было отклонено, хотя диоксиды не являлись сферой научных интересов А. А. Бочвара и ему, как металлургу, более близкими были сплавы. Сейчас вся атомная энергетика основана на использовании ядерного топлива в виде диоксидов делящихся материалов.

Другой пример. В 60-х гг. после аварии на самой большой тогда в мире Дрезденской атомной электростанции в США, которую связывали с протеканием пара-циркониевой реакции, среди специалистов воцарились пессимистические настроения относительно использования циркония в ядерных реакторах.

Нашлись такие люди и в нашем институте, ими же было подготовлено решение о закрытии циркониевой тематики и переквалификации специалистов. С этим предложением они пришли к директору института А. А. Бочвару. По воспоминаниям одной из сотрудниц, которой как раз и предстояла переквалификация, цель визита вызвала у Андрея Анатольевича большое раздражение. Не давая развить тему, он резко ответил: "Сегодня не нужен цирконий, а завтра потребуются, и именно для этого мы готовим ученого-специалиста. Все". В молчании все вышли из кабинета.

А. А. Бочвар не только не остановил работы по цирконию, как предлагалось, а развил их. Сегодня атомная энергетика не мыслима без сплавов циркония, а наши достижения в этой области очевидны и признаны на мировом уровне.

Энциклопедические знания и способность анализировать не только одно явление, но и его место в со-

ca
a.
ca
a.1
:O
1A
ci
ci
2
:S
:S
φ
ir::::
1
o
, ..

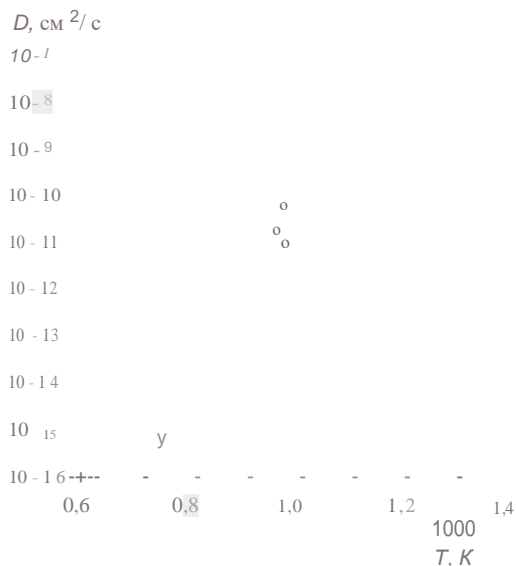


Рис. 11. Температурная зависимость коэффициента объемной самодиффузии урана:

темные значки - российские данные; светлые значки - зарубежные данные; линия - наиболее вероятная теоретическая зависимость

с.
Z
O
u:a
ci
ci
2
S
ф
ic:
o'
o
...

вокупности явлений, о чем уже было упомянуто, позволяли А. А. Бочвару иметь собственное мнение, пусть даже оно противоречило общепризнанному.

Характерен случай со значением энергии активации самодиффузии урана, которая является фундаментальной величиной, определяющей термически активируемые процессы. Уже первые исследования самодиффузии в уране, проведенные у нас и в США, показали низкие значения энергии активации. Уран был отнесен к аномальным металлам, в которых диффузия происходит по кольцевому механизму. К началу 60-х гг. было проведено еще несколько независимых исследований во Франции и Великобритании, которые привели к близкому результату и подтвердили первые данные.

Однако А. А. Бочвар ставит новую серию экспериментов по самодиффузии урана. Вероятно, это было обусловлено его хорошим пониманием поведения урана при термической обработке и общих закономерностей, характерных для металлов, в частности установленного им правила для рекристаллизации металлов.

В результате проведенных исследований было обнаружено, что значение энергии активации урана оказалось в полтора раза больше (рис. 11), о чем было сообщено в докладе на Третьей Женевской конференции в 1964 г.

Позже в новой серии экспериментов российские ученые при тщательном разделении пограничной и объемной диффузии установили величину энергии активации, очень близкую к значениям, предложенным А. А. Бочваром.

Недавно его последователи вновь подтвердили эти данные, теоретически и экспериментально ис-

Рис. 1

Рис. 12. Поперечное сечение сверхпроводника на основе Nb3Sn

следуя процессы, вызванные облучением, такие как накопление и отжиг точечных дефектов, газовой-вакансионное распухание урана.

Таким образом, уран из аномальных металлов превратился в "нормальный". Тем не менее, до сих пор в зарубежных справочниках по фундаментальным свойствам урана приводятся заниженные значения энергии активации самодиффузии урана.

В 1970 г. А. А. Бочвару за выдающийся вклад в развитие теории сплавов, позволившей создать и внедрить в промышленность новые материалы, первому среди российских ученых была присуждена Академией Наук золотая медаль им. Д. К. Чернова.

Являясь директором крупного института, он лично отвечал за многие материаловедческие проблемы атомной отрасли. Это и цирконий для атомной энергетики, ядерное топливо для реакторов на тепловых и быстрых нейтронах, реакторов специального назначения, материалы с особыми ядерно-физическими свойствами, сверхпроводящие материалы и многое другое, в том числе он отвечал за не свойственные металловеду вопросы радиохимии.

Такой широкий спектр вопросов, конечно, отнимал много времени на организационно-хозяйственную работу. Однако, в отличие от многих руководителей такого ранга, Андрей Анатольевич продолжал интенсивно заниматься научно-исследовательской работой и буквально заряжал своей энергией и работоспособностью других.

Свою теорию сверхпластичности металлов и сплавов, которая принесла ему мировую известность, он распространил на уран. Под его непосредственным научным руководством были исследованы уран и сплавы систем U - Mo, U - Mo - Zr, U - Mo - Nb.

Требования к структуре сплавов для реализации эффекта сверхпластичности, сформулированные ранее А. А. Бочваром для легких сплавов, такие как создание мелкозернистой структуры, химический состав, обеспечивающий растворно-осадительный механизм течения по границам зерен, и другие, были блестяще подтверждены на сплавах урана, в том числе и на совершенно хрупких материалах, таких как силицид урана. Следуя принципу А. А. Бочвара "от

им
ты
обь
пор
цы
сти
це

ис
ем

нб
ся
гл
к

ч
н
м
о
в

a)

Рис. 13. Поперечное сечение никель-титанового ко, з

теории и научных исследований "промышленности", его талантливые ученики, многие из которых присутствуют сейчас в зале, воплотили эти технологии на заводах отрасли. Более того, они пошли дальше, реализовав эффект сверхпластичности на однофазных материалах и даже на таком уникальном материале, как плутоний.

Использование эффекта сверхпластичности, эффекта запоминания формы, новых приемов обработки металлов давлением, таких как пульсирующее нагружение, изотермическая штамповка и т.п., произвело переворот в технологиях урана и плутония для атомной оборонной техники.

Не забывал он и об обычных материалах. В 1976 г. им вместе с учениками были опубликованы результаты исследований сверхпластичности хрупкого при обычных условиях белого чугуна. Используя методы порошковой металлургии, были изготовлены образцы со структурой, позволившей достичь пластичности 150 % при скорости деформации несколько процентов в минуту. Это является лучшим достижением даже для таких пластичных материалов, как стали.

Как директор, А. А. Бочвар проявлял постоянную заботу об оснащении института самым передовым исследовательским и технологическим оборудованием, расширением производственных площадей.

В немалой степени этому способствовал огромный авторитет А. А. Бочвара, которым он пользовался в Министерстве и Правительстве, и поэтому возглавляемый им институт всегда отличался в отрасли количеством уникального оборудования.

Это послужило одной из причин, по которой в начале 60-х гг. А. А. Бочвару предложили заняться технологией сверхпроводящих материалов. Руководимый им коллектив технологов прошел длинный путь от первого отечественного одножильного сверхпроводника из сплава ниобия и циркония до конструкций, содержащих десятки тысяч сверхпроводящих волокон в одном проводе и состоящем из множества металлов и сплавов (рис. 12).

Ученики А. А. Бочвара, постоянно совершенствуя технологию, создали сверхпроводящие материалы, которые сейчас признаны лучшими в мире. Более того, перенесли эти технологии на другие изделия,

Рис. 14. Кристаллизация никель-титанового сплава: а - аморфное состояние при скорости охлаждения 10000 °C/с; б - фиксация начала кристаллизации при скорости охлаждения 1000 °C/с; в - вид эвтектики при скорости охлаждения 100 °C/с

получили высокоэлектропроводный и высокопрочный нанокomпозиционный провод, содержащий на квадратный миллиметр десятки миллионов ниобиевых жил, распределенных в медной матрице (рис. 13).

Одобренная в свое время А. А. Бочваром идея создания уникальной вакуумной установки для лития под давлением и ее изготовление позволил и значительно расширить технологические параметры лития сплавов - от давлений в несколько атмосфер, которые использовал Бочвар в 30-е гг., перейти к давлениям в тысячи атмосфер и к ростам охлаждения расплава в сотни тысяч градусов в секунду.

Это позволило ему впервые, используя высокие скорости охлаждения, "замораживать" структуру расплава и осуществить мечту А. А. Бочвара 40-летней давности - непосредственно наблюдать процесс эвтектической кристаллизации сплавов (рис. 14).

