

Международная конференция «Бериллий-77»

Структурные и физические особенности бериллия делают его интересным материалом для исследований и перспективным для практического применения. Обсуждению результатов и подведению итогов металлофизических и технологических исследований бериллия, выполненных за последние годы, была посвящена IV конференция, состоявшаяся в Лондоне в октябре 1977 г. В ней участвовало более 120 чел. из 13 стран, было заслушано и обсуждено более 60 докладов, в которых рассматривались металловедение бериллия, его технология и практическое использование.

Наибольшее внимание было уделено хладноломкости бериллия, обсуждению результатов поиска и реализации перспективных путей повышения его пластичности и вязкости. В последние годы получены новые данные, представляющие не только научный, но и практический интерес. Металлофизические исследования, выполненные в СССР и США, показали, что, несмотря на высокую склонность бериллия к хрупкому разрушению, пластичность поликристаллического металла можно повысить, если ввести в действие дополнительные механизмы деформации, которых в соответствии с критериями Мизеса — Тейлора ему недостает. Такими дополнительными механизмами, приводящими к релаксации напряжений у вершины трещины и снижению температурного порога хладноломкости, могут быть, например, развитое скольжение по обычным системам (прежде всего по плоскостям базиса и призма I рода), слабое проскальзывание по границам зерен, аккомодированное дислокационным скольжением. Однако для реализации последнего механизма необходимо, чтобы металл был мелкозернистым и содержал незначительное количество примесей. Такая возможность повышения пластичности бериллия была установлена сотрудниками Харьковского ФТИ АН УССР при исследовании влияния структурных факторов и примесей на хладноломкость металла. Прочитанные на конференции доклады показали, что такой подход к хладноломкости бериллия в настоящее время получил широкое распространение. Так, Д. Вебстер (США) сообщил о получении образцов изотропного (нетекстурированного) бериллия, который обладает относительным удлинением при 20 °C до 13%. Он считает также, что достижение высоких характеристик пластичности и вязкости в мелкозернистом бериллии высокой чистоты связано с механизмом проскальзывания по границам зерен. Н. Пинто (США) рассказал о новом опытном сорте бериллия, разработанном фирмой «Kaweski Berylco Industries», который в изотропном структурном состоянии при 20 °C имеет $\sigma_b = 56$ кгс/мм², $\sigma_s = 41$ кгс/мм² и $\delta = 4\%$.

О высоких механических свойствах чистого мелкозернистого бериллия с изотропной структурой сообщили также Ф. Олдингер (ФРГ), Г. Тарнер (Великобритания) и др.

Прогресс в улучшении свойств бериллия с изотропной структурой был достигнут благодаря применению чистого электролитического, электрорафинированного или дистиллированного бериллия и новых методов порошковой металлургии, обеспечивающих получение ультратонких порошков и их компактирование без существенного загрязнения металла примесями. Лучшие результаты получены при использовании изоста-

тического прессования порошков. В настоящее время новые методы порошковой металлургии используют для получения промышленных сортов чистого бериллия. Например, фирма KBI (США) производит два новых сорта металла: CIP/NIP-1 (порошок вначале подвергается холодному изостатическому прессованию, затем горячему при 1000—1100 °C) и NIP-50, которые отличаются высокой прочностью и пластичностью, однородностью структуры и состава, изотропностью и повышенным сопротивлением микропластической деформации. Горячим изостатическим прессованием можно получать заготовки и изделия довольно сложной формы.

Несколько докладов было посвящено изучению возможностей плазменного (или термического) распыления бериллия в контролируемой атмосфере. Метод пригоден для получения пористого металла и некоторых тонкостенных изделий. При оптимальных условиях формирования и термообработки физико-механические свойства металла, полученного термическим распылением, сравнимы со свойствами горячепрессованного бериллия.

Для получения некоторых полуфабрикатов и изделий за рубежом используется технология деформации слитков. Фирма KBI, например, изготавливает по этой технологии листы, сверхтонкую фольгу, проволоку. Листы из слитков чистого металла имеют более высокую пластичность, хорошо свариваются. По данным английских исследователей, из таких листов можно штамповать изделия сложной формы.

На конференции было представлено четыре советских доклада, посвященных изучению термоактивированного механизма пластической деформации моно- и поликристаллического бериллия, реализации в металле субзеренной (ячеистой) структуры и получению на ее основе высокоориентированной зеренной структуры, а также исследованию пластической деформации чистого (99,95% Be) мелкозернистого (~ 5 мкм) металла, полученного механико-термической обработкой слитков. Такой металл в квазиизотропном состоянии может обладать высокой пластичностью при комнатной температуре ($\delta = 22\%$) и сверхпластичностью ($\delta \geq 300\%$) при 650 — 700 °C. Эти характеристики существенно превосходят то, что было достигнуто зарубежными исследователями. Доклады вызвали большой интерес участников конференции.

Часть докладов была посвящена применению бериллия. Основными потребителями металла по-прежнему остаются авиационная и ракетно-космическая техника. Применение металла в этих областях расширяется. В некоторых докладах специально рассмотрено использование бериллия для оптических зеркал и гироскопов, т. е. там, где его физические особенности (прежде всего жесткость, структурная и размерная стабильность, сопротивление микропластической деформации и др.) играют первостепенную роль.

Анализ применения бериллия в ядерной энергетике сделал С. Пью (Харуэлл, Великобритания). В настоящее время этот металл используется в некоторых типах реакторов как отражатель и замедлитель нейтронов. Хотя в 60-х гг. были достигнуты определенные успехи в улучшении жаропрочности, сопротивления газовой коррозии, радиационной стойкости бериллия как

материала оболочек твэлов, крупные эксперименты до сих пор не проведены. Рассматриваются возможности применения бериллия в зоне воспроизводства реакторов-размножителей и в качестве материала стенки термоядерного реактора.

Конференция «Бериллий-77», безусловно, была полезной с точки зрения обмена опытом и информацией о состоянии исследований и перспективах применения бериллия.

ТИХИНСКИЙ Г. Ф.

Европейская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу

На VIII конференции, состоявшейся в сентябре 1977 г. в Праге, присутствовало около 300 представителей из 23 стран, в том числе из США, Японии, Канады, Австралии. На четырех секциях было обсуждено около 180 оригинальных, на пленарных заседаниях 17 обзорных докладов. Наибольшее число докладов (около 70 секционных и 7 пленарных) относилось к токамакам.

Как известно, на крупнейших токамаках Т-10 (СССР), PLT (США) омическим нагревом и на несколько меньших TFR (Франция), DITE (Великобритания) с помощью дополнительного нагрева инжекцией пучка нейтральных атомов в настоящее время получают плазму плотностью $n \sim 10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$ температурой $T \sim 1 \text{ кэВ}$ и временем жизни до 50 мс. Одной из кардинальных проблем, встающих на пути продвижения к более высокой температуре, являются примеси, которые влияют не только на энергобаланс плазмы, но и на ее глобальную устойчивость. За небольшой срок, прошедший с конференции в Берхтесгадене*, достигнут значительный прогресс в выяснении механизма образования примесей и их воздействия на динамику плазменного шнура. Основные результаты получены на установке DITE. Легкие примеси (главным образом атомы кислорода) образуются в результате десорбции со стенок камеры циркулирующими между плазмой и стенкой атомами водорода. Попадая в плазму, они охлаждают ее периферию, приводят к перераспределению тока и к последующим неустойчивостям. Тяжелые примеси (атомы материала стенок) образуются в основном из-за спонтанно возникающих униполярных дуг. Ионы примесей с большим атомным номером проникают вглубь плазмы, охлаждают своим мощным излучением ее центральную часть, вызывая «провал» в распределении температуры. Наметились эффективные пути контроля за поступлением примесей:

геттерирование (напыление титана на стенки камеры) для ослабления циркуляции атомов водорода, а следовательно, и десорбции легких примесей;

удаление эффективной границы плазмы от стенок для предотвращения униполярных дуг путем искусственного охлаждения края плазмы (напуск нейтральных газов, создание магнитной диафрагмы, искусственного разрушения крайних магнитных поверхностей для повышения теплопроводности периферии плазмы и др.). На установках DITE, DIVA (Япония) и T-12 (СССР) в разных условиях обнаружено благотворное влияние дивертерных устройств на защиту стенок камеры от бомбардировки частицами и экранировку плазмы от примесей.

Большой вклад в разгадку поведения примесей дали эксперименты на установке Т-4 (СССР), где обна-

ружен эффект выталкивания из горячей плазмы ионов высокой степени ионизации.

Наметились положительные сдвиги в применении более дешевых по сравнению с инжекцией ВЧ-методов нагрева непосредственно ионного компонента плазмы. К ранее полученным на установке АТС (США) результатам по нагреву в области ионно-циклотронных частот добавились первые данные от эффекте нагрева на нижегибридном резонансе (установка «Туман», СССР и «Petula», Франция), а также на винтовых модах (Р-02, двухзаходный стелларатор Сухумского физико-технического института).

В области теории удержания плазмы наибольший интерес привлекли разработки Дж. Коннором и Дж. Тейлором теории размерностей для получения зависимости энергетического времени жизни от параметров плазмы и работы по расчету предельного давления, связанного с так называемой баллонной неустойчивостью плазмы. Большую роль в последних сыграли численные расчеты.

Наряду с токамаками хорошие результаты получены на недавно вступивших в строй стеллараторах второго поколения «Ливень-2», (СССР, ФИАН), «Клео» (Великобритания, Калэм), «Ураган-2» (СССР, ХФТИ), «Вандельштейн VII-A» (ФРГ, Гархинг). При омическом нагреве достигаются параметры, близкие к полученным на токамаках: $T_e = 200 - 900 \text{ эВ}$, $T_i = 100 - 300 \text{ эВ}$, $n = 5 \cdot 10^{12} - 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $\tau_E = 1 - 10 \text{ мс}$, $\tau_p = 5 - 30 \text{ с}$. Довольно высокая эффективность омического нагрева в значительной мере связана с изолирующим действием специфического стеллараторного полоидального магнитного поля. Однако, как отметил в своем докладе И. С. Шпигель (СССР), создается впечатление, что в стеллараторах ионы ведут себя несколько хуже, чем в токамаках. В связи с важностью выяснения перспектив стеллараторов в программе УТС было организовано в 150 км от Праги, в местечке Здикив, Международное рабочее совещание. Одной из основных задач, выдвинутых на совещании, является переход к получению высоких параметров плазмы без омического нагрева (инжекция нейтральных атомов, ВЧ-нагрев). Это во многом могло бы прояснить механизм аномальных потерь энергии плазмы в тороидальных системах.

Об интересных исследованиях динамики стабилизированных пинчей рассказали английские физики. Как численные расчеты (Дж. Вессон и А. Сайкс), так и эксперименты в Калэме показали, что устойчивая конфигурация с перевернутым тороидальным магнитным полем образуется в результате развития винтовой неустойчивости. В настоящее время параметры плазмы в стабилизированных пинчах все еще значительно ниже, чем в токамаках, и в этом, вероятно, повинно взаимодействие плазмы со стенками камеры в процессе перестройки конфигурации.

* «Атомная энергия», 1977, т. 42, вып. 2, с. 155.