Механизмы ВТРО

*Гипотеза Барнса* является одной из первых и наиболее распростра­ненной. Основной причиной ВТРО по этой гипотезе является гелий, образую­щийся в процессе облучения нейтронами, α - частицами и электронами высо­кой энергии. Малорастворимый в металлах гелий при повышенных темпера­турах мигрирует к стокам (границам зерен, выделениям второй фазы, дисло­кациям и пр.) и выделяется на них в виде пузырьков. Плотность образующих­ся гелиевых пузырьков на границе зерен значительно выше, чем внутри зерна. Приложение растягивающих напряжений увеличивает равновесный радиус пузырька, особенно на границах, перпендикулярных направлению напряжения. По достижении некоторого критического напряжения пузырек становится нестабильным и начинает расти с определенной скоростью, зависящей от тем­пературы. Рост и слияние пузырьков на границах, перпендикулярных прило­женному напряжению, уменьшают прочность и способствуют хрупкому разрущению. Теория Барнса не отвечает на многие вопросы ВТРО: не рассматри­вается механизм образования зародышей пузырьков; необъяснимо отсутствие ВТРО в мелкозернистой стали, имеющей на границе зерен пузырьки гелия, и протекание ВТРО в крупнозернистой стали, не имеющей пузырьков гелия на границе, и тд.

Динамический механизм образования зародышей зернограничных пор

можно рассматривать как дальнейшее развитие гипотезы Барнса, но уже с учетом процессов, происходящих в материале при высокотемпературной деформации в присутствии гелия.

Предполагается, что в процессе внутризеренного скольжения на границе зерна образу­ется ступенька (рис. 1), которая при после­дующем межзеренном проскальзывании может привести к образованию поры. Если приложенные напряжения σ достаточно велики,



Где γ *-* энергия поверхностного натяжения и r-радиус поры, то пора будет стабильной и может расти, тогда как при меньших σ она рассосется. Гелий, попадая в пору из твердого раствора, ста­билизирует ее за счет внутреннего давления:



При насыщении поры гелием она может стать равновесной при напряжении σ=0.76γ/r,

т.е. почти втрое меньшем, чем в случае пустой поры. Поступление гелия в пору и стабилизация поры (рис. 1) энергетически выгодны, так как энергия системы Не (в твердом растворе) + пора выше, чем энергия системы твердый раствор + пора с гелием внутри. При испытаниях на растяжение рост заполненных гелием пор начнется при значительно меньших напряжениях, а значит, и деформациях, чем в отсутствии гелия. Рост пор в некотором сечении вызовет его уменьшение, а следовательно,

увеличение напряжения внем и интенсификацию межзеренного проскальзывания в этом сечении:



где ε— скорость межзеренного проскальзывания; А и В - постоян­ные.

Увеличение ε в свою очередь, интенсифицирует зарождение пор, рост которых еще больше ослабляет сечение. Процесс может,как видно, развиваться автокаталитически с локализацией межзеренного проскальзыва­ния и образованием характерной ступеньки на боковой поверхности образца, массовым ростом пор и объединением их в трещину.

Для реализации данного механизма разрушения необходимы факторы:

1) внутризеренное скольжение; 2)межзеренное проскальзывание; 3) эффек­тивная диффузия гелия; 4) эффективная самодиффузия; 5) определенный уровень напряжений.

Факторы 2, 3, 4 реализуются при достаточно высоких температурах испытания, т.е. в том температурном интервале, где наблюдается гелиевое охрупчивание. Повышение T(исп) интенсифицирует эти процессы, контролируемые диффузией, что приведет к усилению охрупчивания.

Рост концентрации гелия облегчает стабилизацию пор, так как при этом уменьшается объем, из которого должен продиффундировзть гелий, необхо­димый для заполнения поры.

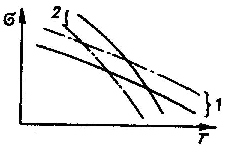
В случае упрочненных материалов напряжение σ достигается при мень­ших деформациях, т.е. упрочнение усугубляет охрупчивание.

Из рассмотренной модели следует, что определяющим фактором охрупчивания является гелий в твердом растворе, мелкие же докритические пу­зырьки влияния не оказывают. Таким образом, уменьшение гелия в твердом растворе будет ослаблять охрупчивание. Этому будет способствовать образо­вание мелких пузырей гелия на выделениях, на границах зерен и на дислокаци­ях, что позволяет говорить о возможных путях борьбы с ВТРО.

***Дисбаланс прочности и границ зерна****.* ВТРО согласно этому механизму обусловлено не только снижением прочности границ зерен из-за образования и роста на них гелиевых пузырьков, но и упрочнением материала тела зерна из-за образования гелий-вакансионных кластеров, дисперсионных выделений, а также торможения процессов полигонизации и рекристаллизации.

Действительно, атомы гелия, внедренные в решетку металла, упроч­няют тело зерна уже при низких температурах. Это упрочнение особенно заметно при изучении микротвердости в насыщенной гелием зоне. Внедренные атомы гелия тормозят дислокации. С другой стороны, атомы гелия приводят к закреплению вакансий и вызывают торможение таких процессов, как переползание дислокации, полигонизацияи рекристаллизация,которые идутпривысокотемпературной деформациив необлученных материалах.Таким образом, внедренные в кристаллическую решеткуатомы гелия упрочняют зерно.

На рис. 2 схематично показана зависимость прочности тела зерна и границ зерен от температуры. При низких температурах прочность границ выше прочности тела зерна, поэтому деформация и разру­шение идут по телу зерна. С увеличением температуры прочность границ зерен сни­жается быстрее,чем прочность тела зерна. При некоторой температуре, называемой когезивной, прочность их становится одинаковой. Действие гелия в материале двояко: он увеличивает прочность тела зерна и ослабляет при высоких температу­рах и высоких концентрациях гелия проч­ность границ за счет развития на них газовых пузырьков. В результате проис­ходит нарушение баланса прочности и пластичности тела и границ зерен. На схеме рис. 2 пунктиром показаны температурные зависимости прочности тела и границ зерен после насыщения гелием. В результате происходит пони­жение эквикогезивной температуры за счет указанных процессов, т.е. появ­ление тенденции к разрушению по границам зерен.



***Гипотеза отрицания роли гелия в ВТРО****.* Данная гипотеза основывается на том, что ВТРО проявляется наиболее ярко в материалах, склонных к высо­котемпературной потере пластичности даже без облучения. Обращается внимание на то, что в некоторых материалах (медь, никель, сплавы никеля, аустенитные нержавеющие стали и др.) при испытании на рас­тяжение в интервале температур 0,5 -0,6 *Тпл* наблюдается резкое уменьшение пластичности и межзеренное разрушение. Предполагается, что такой механизм разрушения связан с присутствием примесей и их сегрегации на границах. Такими примесями являются: сера в никеле, фосфор, сурьма и олово в аустенитной хромоникелевой стали и др. Облучение таких, склонных к охрупчиванию в исходном состоянии, материалов может стимулировать процессы пере­распределения примесных элементов и образования зернограничных сегрега­ций. При этом перераспределение примесей изменяет не только структуру и свойства границ зерен, но и поверхностную энергию.

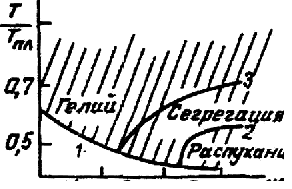
Если предположить, что межзеренное разрушение наступает вследствие образования и развития межзеренных микротрещин, то для их зарождения необходимо достичь критического напряжения



где *γэ-* эффективная поверхностнаяэнергия, для случая интеркристаллитной трещины

*γэ* = *γ - γз; γ* - поверхностная энергия; *γэ* **-** энергия гра­ницы зерна; Lз *—* длина границы зерна.

С изменением *γ* межзеренные микротрещины будут развиваться при разных уровнях τкр. Одни примеси уменьшают, а другие увеличивают *γ,* по­этому их условно можно разделить на опасные и полезные. Опасными являют­ся такие примеси, которые уменьшают *γ*  металла-растворителя и тем самым облегчают зарождение и раскрытие межзеренных трещин. Считают, что S, P, Pb, Bi и As являются опасными, поэтому повышение их концентрации на границах зерен играет важную роль в изменении высокотемпературной пла­стичности. Таким образом, перераспределение примесей и повышение их кон­центрации на границах зерен могут происходить как при облучении, так и в процессе деформирования материала при высоких температурах.



**Обобщенная качественная температурно-дозовая схема ВТРО** представ­лена на рис. 3. Учитывается, что на­рушение баланса прочности тела зерна и границы может быть обусловлено не только образованием гелиевых пу­зырьков и вакансионных пор на грани­цах зерен, но и сегрегацией вредных примесей на границе зерен.

Положение границ 2 и 3 может меняться и зависит от состава материала, температуры иинтенсивности облучения, отношения скорости об­разования гелия к скорости создания первичных дефектов.

Суммируя вышесказанное, можно сделать вывод, что одной из основ­ных и характерных черт ВТРО является интеркристаллитное разрушение мате­риала, и основную роль при этом должна играть деформация по границам зерен. Поэтому для понимания явления ВТРО необходимо дальнейшее изуче­ние процессов, влияющих на структуру, свойства и химический состав границ зерен, а также на зернограничную деформацию.

В заключение необходимо отметить, что эффект воздействия гелия на механические свойства материалов при высоких температурах еще не нашел достаточно полного теоретического обоснования. Эффект падения пластичности в каждом конкретном материале не может быть предсказан теоретически, и в каждом отдельном случае необходимы специальные эксперименты.

Список литературы:

1. Лошманов Л.П. Влияние облучения на механические свойства конструкционных материалов. М.: Изд. МИФИ, 1983.
2. Лошманов Л.П Упрочнение металлов радиационными дефектами. М.: Изд. МИФИ, 1989.