

Если бы мартенситное превращение не обладало кооперативной, сдвиговой природой, то было бы в принципе невозможно наблюдать его развитие в приповерхностных слоях предварительно полированных образцов. Г.В. Курдюмов и Л.Г. Хандрос, проводя исследования мартенситных превращений, использовали методику прямого наблюдения (*in situ*) процессов превращения, при этом фиксируя их с помощью кинокамеры. Открытое ими в 1948-1949-х годах явление термоупругого равновесия фаз при фазовых превращениях мартенситного типа в 1980 году Государственным комитетом СССР по делам изобретений и открытий было названо "эффектом Курдюмова" и ему был присвоен регистрационный номер 239. Суть явления состоит в том, что образующиеся упругие кристаллы мартенсита смещают свои границы при изменении температуры и (или) поля напряжений – в сторону мартенситной или исходной фазы с одновременным обратимым изменением геометрической формы образцов [1].

К концу XX века методики исследования *in situ* стали повсеместно применяться – в металлургии, медицине, геологии, информатике, и, тем более, материаловедении.

Одновременно расширилось изучение и применение термодинамически открытых систем, – отличающихся от классических металлургических термодинамически закрытых систем, в которых сдвиг равновесия возможен только при обмене с внешней средой энергией. Примером служат системы Ме–Н, управление которыми достигается не только изменением температуры, но и изменением количества поглощаемого/выделяемого водорода. Системы Ме–Н находят всё большее применение в повседневной жизни, хотя бы потому, что на их использовании основаны все энергетические проекты, от атомной до водородной. При этом, для многих материалов водород все так же остается вредной примесью, от присутствия которой в металле следует избавляться. Например, И.К. Походня с соавторами [2] отмечал, что «при сварке сталей в условиях высоких температур дугового разряда, больших скоростей нагрева и охлаждения металла, получают существенное развитие процессы поглощения газов электродным металлом и сварочной ванной. С увеличением концентрации водорода в металле риск возникновения холодных трещин в сварном соединении и, как следствие, разрушения всей сварной конструкции возрастает». Авторы [2] подчеркивали значение фундаментального изучения поведения водорода в металлах как первого шага для решения проблемы предотвращения индуцированных водородом холодных трещин.

Существуют разные пути изучения фундаментальных закономерностей взаимодействия водорода с металлами, и один из них – исследование процессов, осуществляющихся в модельной термодинамической системе методиками *in situ*. Такими методиками являются методика интегрального измерения удельного электросопротивления на образце (даёт информацию о процессах в объеме образца непосредственно во время превращения) и методика оптической микроскопии *in situ* для регистрации изменений в приповерхностных слоях исследуемого материала.

Для модельных исследований традиционно применяется система Pd–H, поскольку она обладает относительно простой диаграммой состояния и полученные в ней экспериментальные результаты экстраполируют на более сложные термодинамические системы.

Материал и методика эксперимента

В работе использовали проволочные образцы из чистого палладия (99,98%) диаметром 0,5 мм, длиной 23 мм ($\pm 0,3$ мм). Образец в состоянии поставки изгибали в виде буквы «П»,

подвергли отжигу при 1000°C в вакууме 10 Па в течение 1 ч и охлаждали с печью до комнатной температуры. Затем на верхней части образцов готовили металлографические шлифы по специально разработанной методике, сводящей к минимуму наклеп в приповерхностных слоях образца.

Для осуществления фазового превращения шлифы насыщали водородом «в обход» купола двухфазного состояния в условиях (100°C, $P_{H_2} = 2,3$ МПа) так, чтобы не произошло распада твердого раствора водорода в палладию. Затем непрерывной откачкой вакуума инициировали фазовый переход и фиксировали на видеокамеру развитие обратного гидридного $\beta \rightarrow \alpha$ превращения в приповерхностных слоях образца в косом освещении.

Экспериментальные результаты и обсуждение

В данной работе был проведен анализ зафиксированных видеок кадров превращения. Они представлены на рисунке 1.

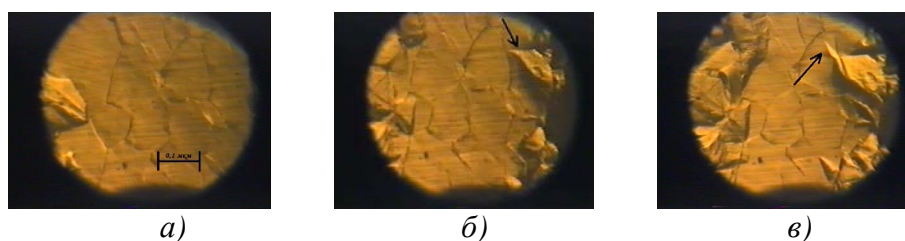


Рисунок 1 – Видеок кадры обратного гидридного фазового превращения, инициированного при $T=100^\circ\text{C}=\text{Const}$ непрерывной откачкой вакуума.

а) – 2 мин 50 с, шкалой отмечено расстояние 0,1 мкм, б) – 9 мин, в) – 13 мин 30 с от начала развития фазового превращения

Из рисунка видны следующие характерные особенности гидридного фазового превращения при 100°C:

1. Вначале превращение развивается путем роста массивных выделений, постепенно и с равномерной скоростью заполняя материнское зерно (рис.1а, б). По оценкам, скорость роста массивных выделений составила $2,7 \times 10^{-6}$ м/с.

2. На границе зерна (рис.2б, показано стрелкой) рост выделения замедлился и после заполнения всего зерна осуществилась смена механизма превращения: зерно «выбросило» игловидный отросток (рис.1в), «прорастая» в соседнее зерно. При этом, скорость роста возрасла на порядок: для игловидного отростка она составляла уже $1,85 \times 10^{-5}$ м/с.

Эти закономерности: замедление скорости роста новой фазы на границе зерна, выбрасывание игловидного отростка с резким увеличением скорости его роста, – весьма аналогичны явлению термоупругого равновесия превращающихся фаз при мартенситных превращениях, с одной существенной разницей. Для превращений, индуцированных водородом, вклад температуры и упругих напряжений недостаточен; значительный вклад вносится составляющая, определяемая давлением газообразного водорода. Таким образом, при гидридных превращениях имеет место термо-баро-упругое равновесие. Оно является гораздо более сложным явлением, осуществляющимся путем диффузионного перераспределения водорода в подсистеме внедрений при кооперативной перестройке металлической матрицы. Иными словами, существуют внутренние напряжения в металлах, которые возникают в металле исключительно в результате перераспределения в нем водорода. Масштаб этих внутренних напряжений – предмет будущих исследований.

Список использованных источников

1. Гуляев А.П. Металловедение. Учебник для вузов. 6-е изд., перераб., и доп. М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
2. И. К. Походня. Индуцированные водородом холодные трещины в сварных соединениях высокопрочных низколегированных сталей (Обзор) / И. К. Походня, А. В. Игнатенко, А. П. Пальцевич, и др. // Автоматическая сварка. 2013. №5. – с. 3 – 14.