

В. И. Шаповалов

Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск
 Национальные лаборатории Сандиа, Альбукерке, Нью-Мексико (США)
 Корпорация исследований материалов и электрохимических процессов, Тусон, Аризона (США)

Литье в твердом состоянии, или История одного открытия. Сообщение 2*

Дана краткая историческая справка об открытии так называемого эффекта аномальной спонтанной деформации (АСД). Приведены новые экспериментальные и теоретические данные о механизме этого эффекта. Проанализированы состояние и перспективы научного изучения и практического использования этого необычного явления.

Ключевые слова: водород, металл, фазовые превращения, аномальная спонтанная деформация, квазжидкое состояние

Механизм АСД. Макростроение Н-слоев и макромеханизм АСД. На основе проведенных разнообразных экспериментов была разработана общая теоретическая модель строения Н-слоев [1-3] в трех- и двумерном вариантах. В макромасштабе модель Н-слоя выглядит в виде трех перекрывающихся зон (рис. 1). Основным элементом Н-слоя – зона перестройки кристаллической решетки и аккумуляции водорода (зона 2), наличие которой при этом определяется $\gamma \rightarrow \alpha$ полиморфным превращением и скачкообразным уменьшением растворимости водорода. Для данных исходных условий эта зона должна быть плоской, хотя в реальной ситуации она может быть шероховатой и даже «островковой». Кроме того, у нее существенно больший удельный объем по сравнению как с γ -, так и α -фазой.

Перед этой зоной располагается параллельная ей зона предварительной деформации (зона 1), которая возникает вследствие того, что близлежащие атомные слои, где содержание водорода близко к равновесному, подвергаются механическому воздействию со стороны основной зоны 2. Очевидно, что здесь возникают значительные растягивающие напряжения, ориентированные параллельно межфазной границе. Если они превышают предел упругости, то происходит пластическое течение металла в соответствующем направлении. Замыкает Н-слой (с точки зрения направления его движения) зона диффузии водорода (зона 3). Здесь происходят интенсивная диффузия водорода в двух направлениях: к γ -фазе (накопление водорода) и внутрь α -фазы (рассасывание водорода в объеме). Именно от баланса этих диффузионных потоков, направленных в противоположные стороны, и зависит концентрация водорода в Н-слое.

Суммарное увеличение ширины образца (ΔV) складывается из трех составляющих: необратимой пластической деформации во всех трех зонах (ΔV_1); обратимой деформации, связанной с нормальным полиморфным $\gamma \rightarrow \alpha$ превращением (ΔV_2); обрати-

мой деформацией, связанной с растворенным водородом в первой зоне (ΔV_3): $\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_3$.

Очевидно, что после последующего нагревания и соответственно полного цикла $\gamma \rightarrow \alpha \rightarrow \gamma$ превращения остаточная деформация составит ΔV_1 , а после многократного числа циклов (n): $\Delta V_n = n\Delta V_1$.

Используя основную идею трехзонной структуры Н-слоя, рассмотрим вариант его радиальной формы в цилиндрическом образце (рис. 2).

Очевидно, что дилатация кристаллической решетки под действием водорода в этом случае приведет к возникновению как продольных, так и радиальных

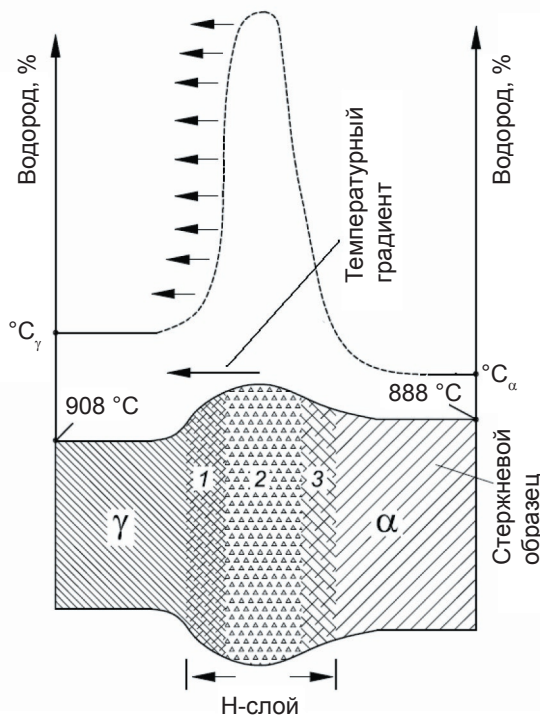


Рис. 1. Основные структурные зоны Н-слоя и распределение водорода в его окрестностях; стрелками показано направление перемещения Н-слоя при охлаждении образца: 1 – предварительной деформации аустенита; 2 – накопления водорода и перестройки кристаллической решетки; 3 – диффузии водорода

* Сообщение 1 опубликовано в журнале «Металл и литье Украины» № 11, 2011 г.

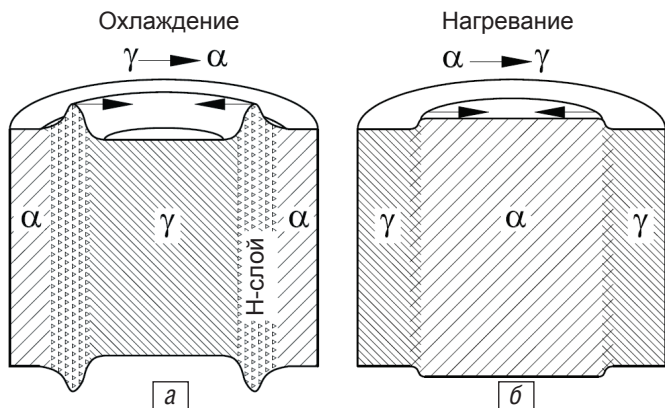


Рис. 2. Схема расположения Н-слоя в цилиндрическом образце при радиальном охлаждении (а) и схема движения фронта $\alpha \rightarrow \gamma$ при радиальном нагревании (б) в отсутствие Н-слоя

напряжений. Первые связаны с тем, что зона перестройки и аккумуляции водорода имеет аномально большой удельный объем и приводит к локальному увеличению длины цилиндра. Вторые являются следствием той же дилатации, увеличивающей длину окружности кольца, заключающего в себе Н-слой. В результате такой деформации образец будет удлиняться вдоль оси симметрии, а не укорачиваться, как в плоской модели. Для цилиндрического образца из-за неоднородности теплового поля по радиусу скорость перемещения Н-слоя будет функцией расстояния от него до центра симметрии.

Аналитические расчеты показывают, что интенсивность удлинения образца в радиальном направлении будет различной, что приведет к изменению формы торцов от плоской к изогнутой. В зависимости от скорости движения Н-слоя торцы могут стать выпуклыми или вогнутыми. Эксперименты показали, что чаще всего практически реализуемые скорости охлаждения находятся слева от экстремума, поэтому торцы образцов обычно приобретают вогнутую форму. Кроме того, по мере продвижения Н-слоя внутрь образца его скорость уменьшается, что также влечет за собой ослабление АСД.

Радиальные растягивающие напряжения при движении Н-слоя от поверхности внутрь цилиндра (при радиальном варианте охлаждения) должны приводить к увеличению диаметра образца и, соответственно, сокращению его длины. Очевидно, величина изменения радиуса является функцией самого радиуса, а радиус непрерывно уменьшается по мере движения Н-слоя, так что в центре образца на оси симметрии степень радиальной деформации стремится к нулю.

Таким образом, при радиальном охлаждении интенсивность и характер АСД очень сильно зависят от геометрических очертаний образца и его размеров. С уменьшением отношения радиуса к длине снижается величина суммарной деформации. Значит, существует такое соотношение радиуса к длине, при котором продольная и поперечная деформации равны.

Тонкое строение Н-слоев. Что же происходит в самом Н-слое? Какую он имеет микро- и атомную структуру? Почему дислокации в нем имеют столь высокую подвижность, обеспечивая аномально низкий предел текучести?

Объясним вначале последнее. Достоверно известно, что при довольно высокой температуре (около 900 °С) водород прочно не связан с дислокациями и не может препятствовать их движению. С другой стороны, существует много экспериментальных данных, которые свидетельствуют о том, что водород может ускорять движение дислокаций (хотя ни в одной из работ не предложен механизм такого ускорения).

Как представить такое необычное поведение водорода по отношению к дислокациям, противоречащее, на первый взгляд, общей теории влияния примесей на механические свойства металлов? Это явление можно объяснить, базируясь на известных положениях физики металлов. В общем случае краевые дислокации имеют относительно большую протяженность, и вполне очевидно, что вдоль дислокационной линии не могут действовать абсолютно одинаковые напряжения. Следовательно, есть участки с максимальными напряжениями, которые первыми начнут смещение. Это приведет к возникновению на границах такого участка некоторой переходной структуры, которая названа В. Зегером «перегибом дислокации». Эти перегибы могут быть как на краевых, так и винтовых дислокациях (рис. 3).

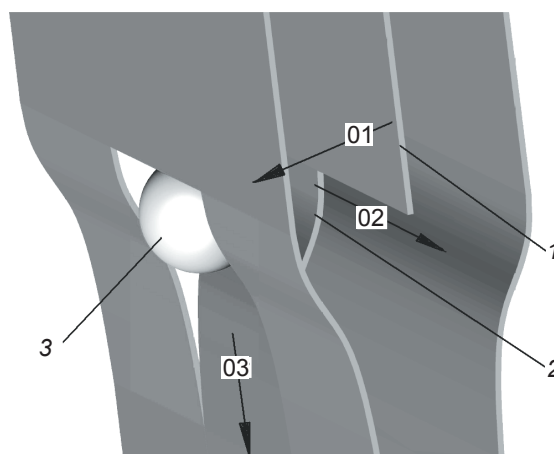


Рис. 3. Парный перегиб на краевой дислокации: 1 – экстра-плоскость краевой дислокации между двумя атомными слоями; 2 – перегиб; 3 – примесный атом внедрения или замещения (стрелками показаны возможные направления движения перегиба: 01 – традиционное скольжение краевой дислокации; 02 – тангенциальное скольжение перегиба; 03 – нормальное скольжение перегиба)

Перегибы играют важную роль как в начале движения дислокаций, так и в процессе их движения. Они являются лидирующими участками и без их наличия вообще трудно объяснить тонкий механизм скольжения дислокаций. В случае, когда перегиб возникает на самом конце дислокации, то он непарный. Если же перегиб возникает между концами дислокации, – он всегда парный. После возникновения перегиб скользит вдоль дислокационной линии под действием соответствующих механических напряжений. В случае парных перегибов (что должно быть гораздо чаще) оба перегиба скользят вдоль дислокационной линии либо в одном направлении, либо в противоположные стороны и за счет этого скольжения, соответственно, и происходит перемещение дислокации в новое положение. Кооперативное (одновременное)

смещение всей дислокационной линии в новую позицию возможно теоретически, но в реальном случае это представить весьма сложно. Следовательно, общая подвижность дислокаций должна определяться подвижностью перегибов, а также их количеством.

Следует особо отметить, что наличие перегибов делает возможным скольжение дислокации не только в направлении вектора Бюргерса, но и перпендикулярно ему. Иными словами, дислокации могут легко перемещаться (скользить) во всех трех направлениях, так как их экстраплоскости могут легко удлиняться вследствие перемещения перегибов в нормальном направлении. Таким образом, известный термин «консервативное движение дислокаций» (как аналог термину «скольжение дислокаций») при наличии на них перегибов будет некорректным. Кроме того, при движении в нормальном направлении перегиб легко увлекает атом водорода и, таким образом, резко ускоряет диффузию водорода в кристаллической решетке. В этом случае правильнее будет назвать этот процесс не диффузией, а переносом атомов водорода. Некоторым аналогом такого рода движения атомов является совместное движение примесных атомов и дислокаций, которое называют дрейфовым.

Нарушение равновесного состояния дислокационной линии и образование перегиба может происходить из-за нескольких причин: механические на-

пряжения; тепловые волны; любой точечный дефект, оказавшийся поблизости от дислокационной линии. Таким точечным дефектом может быть и атом водорода, который при высоких температурах обладает аномально высокой подвижностью по сравнению со всеми известными атомами внедрения и замещения. Естественно, что чем выше концентрация водорода, тем больше вероятность взаимодействия его с дислокационной линией и провокации образования перегибов.

H-слой аккумулирует не просто повышенное количество водорода, а аномально высокое, что приводит не только к интенсивному генерированию перегибов, но и значительному ослаблению межатомных связей в этой области. Не исключено также, что такая высокая плотность дислокаций и перегибов в совокупности с ослаблением межатомных связей делает атомную структуру H-слоя настолько хаотичной и нестабильной, что эти области (рис. 4) скорее похожи на переохлажденную жидкость. Можно ли утверждать, что H-слои имеют атомное строение жидкости? На этот вопрос ответить пока очень сложно, так как зафиксировать его каким-либо образом оказалось невозможно. Но это и неважно на данном этапе. Важно, что большинство из свойств H-слоев изучено, и они прямо указывают на его неординарность в ряду известных стабильных и метастабильных фаз.

H-слой при движении в железе оставляет за собой свежееобразованный феррит. Эта фаза вначале пересыщена дефектами кристаллического строения, но из-за высокой температуры идет его быстрая первичная, а затем и вторичная рекристаллизация подобно тому, как это происходит в холоднотемпературном железе при отжиге. Сначала формируются очень мелкие кристаллы феррита, которые быстро увеличиваются в результате последующей вторичной рекристаллизации. В этой области также возможна дополнительная пластическая деформация под воздействием растягивающих напряжений со стороны H-слоя.

Таким образом, полная структурная картина в области H-слоя может быть представлена несколькими областями (рис. 5): исходный аустенит; зона предварительной деформации аустенита; зона перестройки решетки и накопления водорода; зона диффузии

водорода и рекристаллизации феррита; крупнозернистый феррит после вторичной рекристаллизации. Между этими зонами в H-слое не должно быть четких границ. Более того, возможно, что в некоторых случаях H-слой имеет не сплошное, а «островковое» строение (рис. 5) в результате локальных отклонений от химического состава, структуры или вследствие неравномерной диффузии водорода в разных направлениях. В этом случае на некоторых участках H-слой будет прерываться, и тут будет идти полиморфное превращение $\gamma \rightarrow \alpha$ по нормальному механизму.

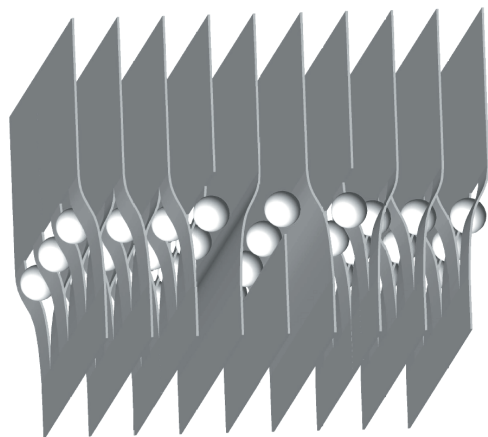


Рис. 4. Схема множественного взаимодействия водорода с перегибами на дислокациях

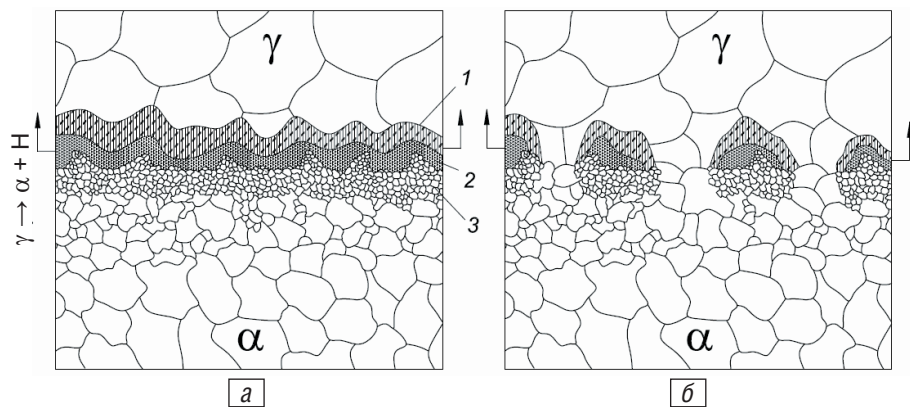


Рис. 5. Схематическое изображение окрестностей H-слоя для фронтов – сплошного (а) и прерывистого («островкового», б): 1 – зона предварительной деформации аустенита; 2 – зона перестройки решетки и накопления водорода; 3 – зона диффузии водорода и рекристаллизации феррита

Практическое использование АСД

Литье в твердом состоянии. Это направление использования АСД можно пока отнести к несколько отдаленному будущему. Тем не менее, вполне возможно, что такой необычный полуфантастический метод формирования изделий сложной конфигурации найдет свою нишу в технологии обработки металлов. Эта технология будет включать в себя особое герметичное устройство (рис. 6) и следующие этапы: получение исходной заготовки простой формы и заданной массы; помещение заготовки в герметичную рабочую камеру, наполненную водородом или смесью водорода с инертным газом; АСД путем термоциклирования с использованием управляемых компьютером нагревателей; разгерметизация рабочей камеры и извлечение готовой детали; удаление водорода из изделия путем вакуумного нагревания (при необходимости).

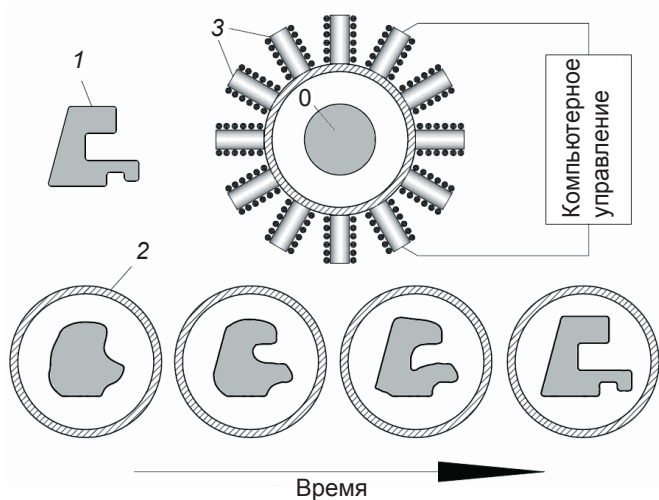


Рис. 6. Общая схема деформации без прикосновения: 0 – заготовка простой формы; 1 – заданная форма изделия; 2 – герметичная рабочая камера; 3 – управляемые компьютером нагреватели, расположенные в трех измерениях (внизу – схема трансформации заготовки в изделие во времени)

Привлекательность этой технологии заключается в следующем: отпадает необходимость использования дорогостоящих инструментов; большая экономия материала, так как практически исключены отходы; процесс экологически чистый и может быть полностью автоматизирован; возможна пластическая деформация трудно деформируемых сплавов.

На первый взгляд эта технология действительно кажется фантастической. Однако, ниже приведены примеры осуществления этой технологии уже сейчас. Учитывая накопленный опыт и теорию Н-слоев, можно предположить, что при стабильном радиальном градиенте температуры цилиндрический образец будет трансформироваться в трубу по одной из схем, показанных на рис. 7 и 8 (в действительности так и оказалось).

В другом случае трансформировали исходную цилиндрическую трубную заготовку в конусную с одной стороны. Были также проведены удачные эксперименты с трансформацией формы стержней в другие геометрические формы (рис. 9).

Монолитные изделия сложной формы можно

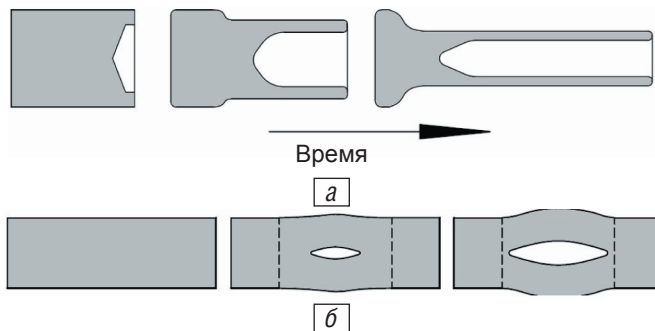
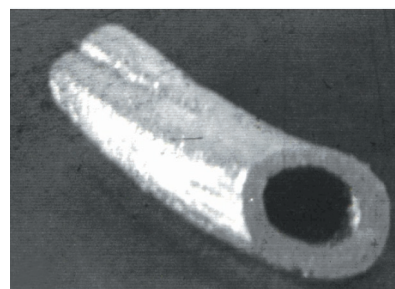


Рис. 7. Возможные схемы трансформации цилиндрической заготовки в трубу (между пунктирными линиями – зона АСД): торцевая АСД (а); центральная АСД (б)



а

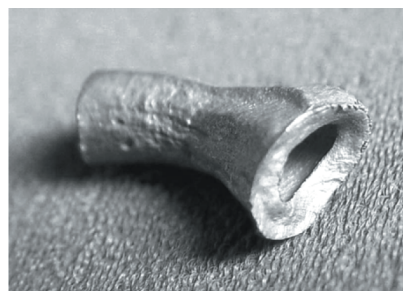


б

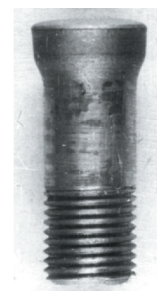
Рис. 8. Трубки а и б (длина около 20 мм, монолитные концы отсечены), полученные по схемам: рис. 7, а (справа) и рис. 7, б (слева)

также получать подобно пористым – в разборной форме из аустенитной нержавеющей стали, хотя в этом случае есть некоторые особенности технологии, которые отличают ее от получения пористых изделий. Одно из изделий, полученное таким способом, показано на рис. 10.

Получение пористых материалов. Как было показано выше, АСД при повышенных давлениях приводит к появлению в исходных монолитных образцах упорядоченной пористости. Она представляет собой



а



б

Рис. 9. Примеры заданной АСД: редуцирование одного конца трубки \varnothing 10 мм в 20 мм (а); получение формы заклепки из правильного цилиндра \varnothing 12 мм (б)



Рис. 10. Резьба, «нарезанная» на железе с использованием АСД в литейной форме из аустенитной нержавеющей стали (виден горизонтальный гребень металла, «затекшего» в зазор разборной формы, диаметр изделия 12 мм)

чередующиеся приблизительно на равных расстояниях друг от друга округлые поры, не соединенные между собой. Форма пор зависит от преимущественного направления течения металла при АСД. Если образец удлиняется только в одном направлении, то все поры вытянуты и ориентированы в соответствующем направлении (рис. 11). Соотношение осей эллипсоидов тоже меняется в зависимости от параметров термоциклирования. Возможен также вариант, когда тепловое поле при АСД имеет радиально сферическую симметрию. В этом случае поры получают близкими к сферическим, а образец просто увеличивает свой объем, не изменяя формы (рис. 12, а). Но форма пор может быть как сферической, так и эллипсоидальной с радиальной ориентацией (рис. 12, б).

Возможен также вариант, когда АСД охватывает только часть исходного образца. В этом случае поры формируются только в этой части (рис. 11, б, в), что также может быть практически полезно, особенно в тех случаях, когда надо надежно соединить пористое изделие с монолитным либо получить пористую сердцевину или поверхностный слой.

После АСД в общем случае у поверхности образцов рельеф бугристый, поэтому для получения гладкой поверхности термоциклирование следует производить внутри оправки, имеющей внутреннюю поверхность, соответствующую будущему изделию. Это может быть как простая геометрическая форма (труба, ящик, сфера), так и более сложная. Дело в том, что при АСД за счет очень высокой пластично-

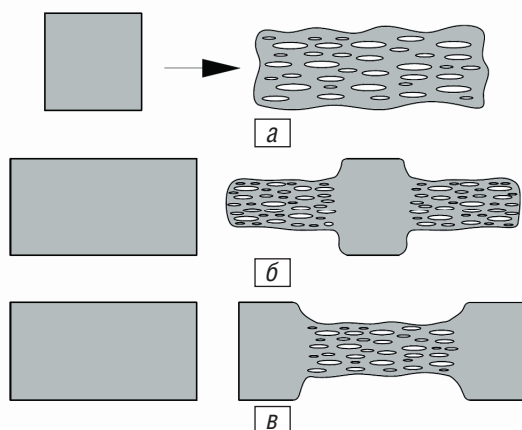


Рис. 11. Схема получения пористой структуры для АСД, приводящей к удлинению образцов: во всем образце (а); в наружной части (б); в центральной части (в)

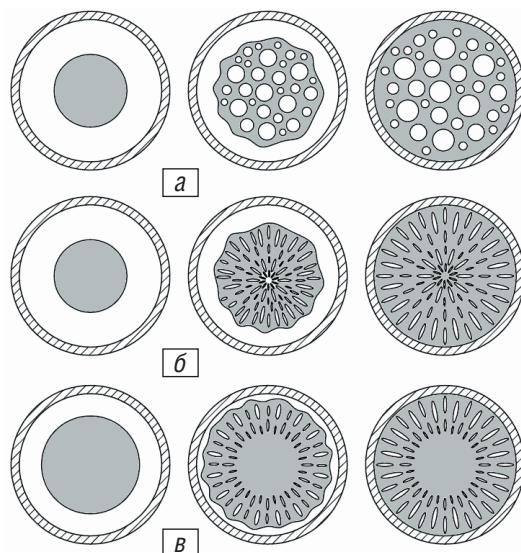


Рис. 12. Схема получения пористых изделий с применением оправки (заштрихована): сферическая пористость (а); радиальная пористость во всем изделии (б); радиальная пористость только у поверхностной части (в)

сти пористый материал, разбухая, полностью заполняет оправку изнутри, подобно хлебу, выпекаемому в форме (рис. 13).

Описанным выше способом можно получать только материалы с закрытыми изолированными порами. Такой материал непроницаем для газа и жидкости и преимущественно он может быть использован как легкий конструкционный материал со специальными механическими и теплофизическими свойствами.

В то же время, если в качестве заготовок использовать спрессованные порошки, то после АСД можно получать пористые проницаемые материалы (рис. 14), имеющие при равной пористости (особенно при степенях пористости выше 50 %) более высокие механические свойства.

Следует отметить, что подобным способом можно получать не только пористые сплавы на основе

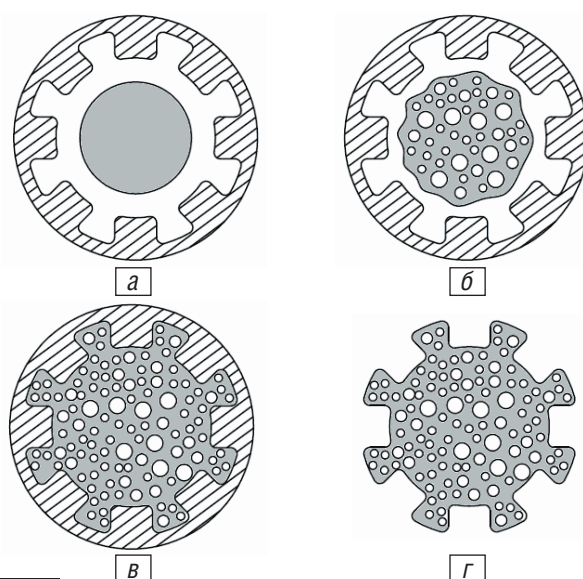


Рис. 13. Схема получения пористых изделий сложной формы: заготовка внутри стальной разборной формы (а); начало АСД с порообразованием (б); порообразование до полного заполнения формы (в); готовое пористое изделие после разборки и удаления формы (г)

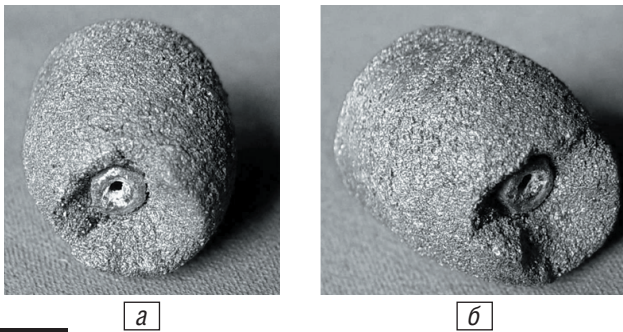


Рис. 14. Вид образцов проницаемого пористого железа, полученного путем АСД из прессованных (не спеченных) порошковых цилиндров исходным диаметром 12 мм; трансформация пористости от 15 до 65 %; увеличение прочности в 25 раз (в центре отверстие для заделки термопары)

железа, но и гидридообразующие металлы, например титан [4-6].

Улучшение обрабатываемости давлением при высоких температурах. Возможен также вариант использования эффекта АСД только частично – для увеличения пластичности материала во время горячей пластической деформации [7, 8]. При этом в материале генерируются Н-слои, имеющие аномально высокую пластичность. Этого можно добиться насыщением заготовки водородом перед деформацией, а затем вести деформацию (ковку, прокатку, экструзию) традиционным способом. Но необходимо точно выдерживать интервал температур, соответствующий полиморфному превращению. В результате при постепенном охлаждении, идущем естественным путем, в материале будет происходить газозвтектоидное превращение, сопровождающееся формированием Н-слоев. В случае расширенной температурной области данного превращения (это можно сделать, подбирая химический состав сплава) Н-слои будут возникать практически во всем объеме материала, резко увеличивая его пластичность. После завершения формирования изделия водород можно удалить вакуумным нагреванием, если это необходимо для данного сплава. Этот способ позволяет резко увеличить производительность и экономить средства на уже имеющемся оборудовании путем длительного использования инструментов, которые будут работать со значительно меньшими нагрузками.

Получение гидридов высокой чистоты. Исследования взаимодействия водорода с гидридообразующими металлами (цирконий, гафний, титан, палладий) показали существенное отличие механизма фазовых превращений в этих металлах от системы Fe-H. Для примера исследовали систему гафний-водород [9], включающую эвтектоидное превращение ($\beta \rightarrow \alpha + \delta$) при температуре около 700 °С. Первый этап реакции – начало $\beta \rightarrow \alpha$ полиморфного превращения (зарождение α -фазы) также сопровождается пресыщением межфазной границы водородом, который не успевает диффундировать в глубь металла и к наружным слоям. Высокие концентрации водорода приводят к деформации решетки и увеличению ее дефектности. Как только концентрация водорода на границе двух фаз достигнет величины, достаточной для образования гидрида, происходит химическая

реакция и на фронте превращения появляется новая фаза – гидрид металла. Пресыщение фронта $\beta \rightarrow \alpha$ полиморфного превращения водородом в этом участке резко снижается и синтез гидрида при этом прекращается. Дальнейшее движение фронта полиморфного превращения вглубь металла многократно повторяет этот процесс. В результате, после прохождения фронта полиморфного превращения по объему металла, получаем металлическую α -матрицу с вкраплениями гидридов различного стехиометрического состава. Использование этого эффекта позволяет вести гидрирование металла по всему его объему, а не только с поверхности. У гидридов меньшая плотность и большая твердость, чем у металла, поэтому, когда процесс гидрирования происходит с поверхности образца, внутренний и наружный объемы образца испытывают значительные напряжения, что приводит к образованию трещин. При повторении термоциклов гидриды металла растут постепенно, и весь металл равномерно переходит в химическое соединение. Это приводит к получению гидрида однородного состава с мелкокристаллической структурой и низким уровнем внутренних напряжений. Основные достоинства использования этого эффекта: низкое давление насыщения водорода по сравнению с традиционно используемым; высокая степень и однородность гидрирования; чистота конечного продукта от примесей; значительное ускорение процесса гидрирования.

Особо следует выделить систему палладий-водород, в которой обнаружено значительное упрочнение базового материала в результате фазового наклепа при спонтанной пластической деформации ниже порога первичной рекристаллизации [10, 11].

Использование эффекта импульсного выделения водорода (ИВВ). Как было показано выше, во время ИВВ скорость диффузии водорода возрастает во много раз. Фактически это даже не диффузия, а перенос водорода Н-слоем. Такое ускоренное движение водорода в металле можно использовать в трех направлениях: ускоренное гидрирование; ускоренное удаление водорода в твердом состоянии; ускоренное проникновение водорода сквозь мембраны.

Об ускоренном гидрировании упомянуто выше и это доказано многочисленными экспериментами; сам эффект ИВВ также детально описан, поэтому нет смысла дополнительно это комментировать.

Необходимо остановиться на втором и третьем пунктах. Известно, что водород в большинстве случаев является нежелательной примесью в металлах и сплавах. Причем, он неизбежно присутствует в них, попадая при получении или даже во время эксплуатации изделий. Это приводит к серьезному ухудшению свойств: появлению пор, флокенов, водородной хрупкости и прочим отрицательным эффектам. Желательно, чтобы содержание водорода в таких сплавах было как можно ниже. Хорошо известно, что добиться этого можно разными путями, но все они достаточно длительные и дорогостоящие. Если же организовать охлаждение стали (допустим, после

Газоэвтектоидное превращение

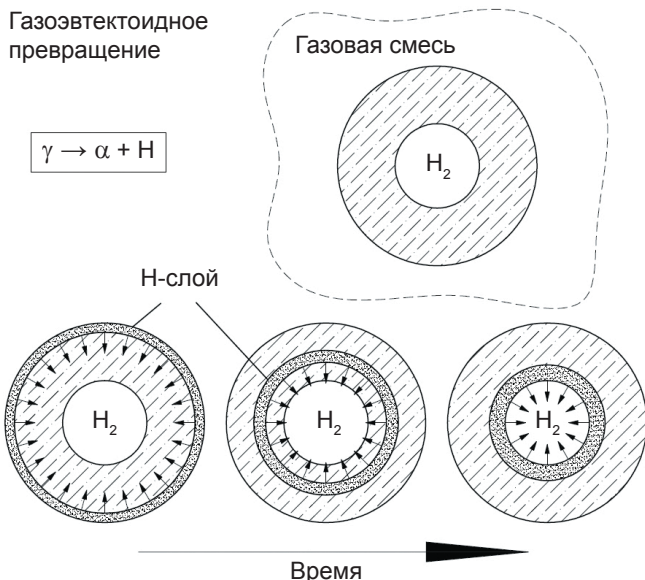


Рис. 15. Схема работы Н-слоев в трубчатой водородной мембране

горячей пластической деформации) таким образом, чтобы в ней возникали Н-слои, движущиеся в нужном направлении, очищая изделие от водорода, то дегазация будет идти намного быстрее и глубже.

Водородные мембраны в настоящее время – это наиболее перспективное направление в получении чистого водорода из различных газовых водородсодержащих смесей [12]. Водородная энергетика тормозится только тем, что пока нет дешевого высокопроизводительного способа получения чистого водорода. Имеющиеся водородные мембраны либо очень дорогие (палладий или палладиевое покрытие), либо дают низкую производительность.

Если же использовать эффект ИВВ, то можно изготавливать водородные мембраны из железа и стали. Причем эти мембраны могут быть сравнительно толстыми и выдерживать высокие давления газа, что дополнительно увеличит их производительность.

Общая схема работы стальной трубчатой мембраны приведена на рис. 15. Н-слой возникает на поверхности мембраны и по мере понижения температуры продвигается к внутренней стенке трубки. При выходе на внутреннюю поверхность Н-слой «разряжается» путем выброса избыточного водорода. После нагревания и последующего охлаждения формируется следующий Н-слой, перемещающийся с поверхности внутрь трубчатой мембраны и т. д. То есть, мембрана работает в режиме термоциклирования между 920 и 890 °С для чисто железного варианта. Если это сталь, то интервал термоциклирования будет определяться интервалом температур полиморфного превращения. Оптимальные скорости нагревания и охлаждения лежат в пределах 1-5 градусов в секунду, что технически осуществляется очень просто. Компьютерное управление всей системой позволит работать такой мембране или многочисленным мембранам в полностью автоматическом режиме.

Индустриальный вариант установки по получению чистого водорода может представлять собой пакет

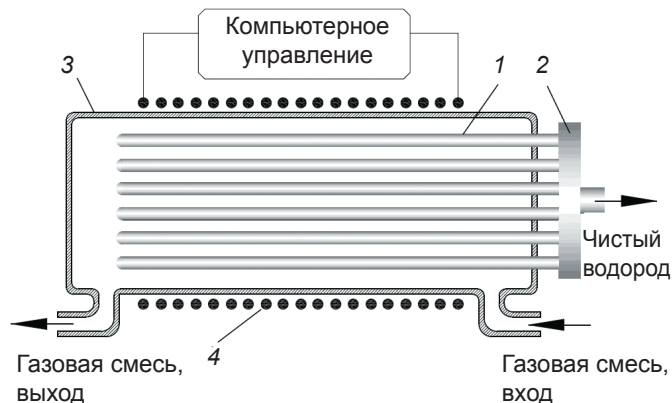


Рис. 16. Схема ячейки для промышленного получения чистого водорода из газовых смесей с использованием Н-слоев: 1 – железные (стальные) трубчатые мембраны; 2 – коллектор водорода; 3 – герметичный цилиндр из аустенитной стали; 4 – нагреватель

трубчатых мембран, помещенный в цилиндрическую камеру, заполняемую водородсодержащей газовой смесью (рис. 16). В эту камеру постоянно подают новые порции свежей смеси и отводят газовую смесь, богатую примесями. В свою очередь, газовая смесь, обедненная водородом, поступает на вторую ступень очистки такого же типа. Таких ступеней может быть несколько (в зависимости от состава исходного газа).

Выводы

Прошло 30 лет с момента первой публикации [3], 26 лет – с момента признания описанного эффекта научным открытием в СССР [1] и 19 лет – с момента появления первой англоязычной публикации о нем в США [20]. Следует признать, что, несмотря на значительный объем накопленного экспериментального материала и достаточно ясный механизм этого явления, практическое его использование пока ограничено. Но даже отдельные случаи оказываются весьма эффективными. Например, была разработана и внедрена промышленная технология получения железнодорожных колес, включающая способ удаления водорода с использованием ИВВ (Нижнеднепровский трубопрокатный завод, г. Днепропетровск). Это позволило полностью отказаться от длительной и дорогостоящей процедуры традиционной противоблоксной обработки и дало в свое время огромную экономию и повышение производительности колесопрокатного цеха. К сожалению, работы в этом направлении в Украине не ведутся после 1991 г. Способ очистки газовых смесей с целью получения чистого водорода имеет широкие перспективы. В США началась разработка промышленных устройств для сепарации водорода от окиси углерода и других газов в исходных термически разрушенных тяжелых углеводородах [12]. Большие перспективы также у способа повышения пластичности титановых и других сплавов при горячей пластической деформации [7, 8]. Реальные перспективы у направления упрочнения металлов с помощью водородного наклепа, являющегося разновидностью АСД [10, 11]. Американские ученые и инженеры [4-6] считают, что вполне реально в ближайшее время освоить промышленную

технологію получения пористых материалов на основе АСД.

Отдельно и особо следует остановиться на научных перспективах дальнейшего исследования данного явления. Очевидно, что тонкий механизм АСД еще далек от детального объяснения и для этого необходимы глубокие исследования с использова-

нием самой современной аппаратуры. Не исключено, что на этом пути могут быть сделаны другие открытия, объясняющие возможность существования квазижидкого состояния материи и особенности фазовых превращений на атомном уровне. Одним из примеров может быть изучение механизма сверхбыстрого переноса атомов водорода H-слоями.

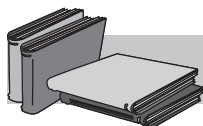
Благодарности

Автор считает своим долгом поблагодарить в первую очередь своего соавтора по открытию В. Ю. Карпова. Его яркий талант экспериментатора в большой степени способствовал получению бесспорных доказательств реального существования этого необычного явления.

Кроме того, автор благодарит всех бывших и настоящих сотрудников лаборатории «Сплав» (НМетАУ), и прежде всего В. В. Трофименко, А. В. Толстенко, Н. В. Антипову, В. Ю. Финк, А. М. Рысину за активную совместную работу и плодотворное обсуждение результатов.

Отдельная благодарность В. Т. Рыскалю за изготовление специальной уникальной аппаратуры, впервые позволившей провести исследования в условиях высоких температур и давлений водорода.

Специальная благодарность от автора известным украинским и российским ученым: Я. Е. Гегузину, В. И. Трефилову, В. А. Гольцову, Д. Ф. Чернеге, А. А. Баранову, Б. А. Колачеву, И. И. Новикову, В. К. Григоровичу, Ю. И. Арчакову за конструктивное оппонирование и подчас весьма острые научные дискуссии, бесспорно способствовавшие корректности объяснения АСД и постановке новых оригинальных экспериментов.



ЛИТЕРАТУРА

1. Шаповалов В. И., Григорович В. К. О природе квазижидкого состояния железа // ДАН СССР. – 1982. – Т. 267, № 4. – С. 877-880.
2. Шаповалов В. И., Карпов В. Ю. О природе аномальной спонтанной деформации и квазижидкого состояния некоторых систем металл-водород // Физико-химическая механика материалов. – 1984. – № 3. – С. 41-45.
3. Шаповалов В. И., Карпов В. Ю. О природе аномальной спонтанной деформации железа в присутствии водорода // Физика металлов и металловедение. – 1983. – Т. 55, вып. 4. – С. 805-811.
4. Schuh C., Dunald D. C. Internal Stress Plasticity Due to Chemical stresses // Acta mater. – 2001. – № 49. – P. 3387-3400.
5. Frary M., Schuh C., Dunald D. C. Strain ratcheting of titanium upon reversible alloying with hydrogen // Philosophical Magazine A. – 2001. – V. 81, № 1. – P. 197-202.
6. Murray N., Dunand D. C. Solid-state foaming of titanium by hydrogen-induced internal-stress superplasticity // Scripta Materialia. – 2003. – № 49. – P. 879-883.
7. Индуцирование водородом термоупругих мартенситных превращений / М. Х. Шоршоров, И. А. Степанов и др. // ДАН СССР. – 1985. – Т. 283, № 2. – С. 370-373.
8. Носов В. К., Колачев Б. А., Павлов Е. И. Водородное пластифицирование жаропрочных титановых сплавов // Изв. АН СССР. Металлы. – 1983. – № 1. – С. 134-151.
9. Karpov V. Y., Rysina A. M., Shapovalov V. I. Application of hydrogenation for the refining and pulverization of metals, Int. J. // Hydrogen Energy. – 1996. – V. 21, № 11/12. – P. 919-922.
10. Goltsov V. A. The effects of hydrogen on the physical properties of palladium // Platinum Metals Review. – 1999. – № 43. – P. 116-118.
11. Гольцов В. А. Индуцированные водородом явления при фазовых превращениях. Взаимодействие водорода с металлами. – М.: Наука, 1987. – С. 264-293.
12. Shapovalov V. I. About quasi-liquid spontaneous deformation in iron-hydrogen system. Carbon nanomaterials in clean energy systems. Edited by B. Baranovsky. – Amsterdam: NATO Science for Peace and Security Series, 2007. – P. 369-373.

Анотація

Шаповалов В. І.

Лиття в твердому стані, або Історія одного відкриття.

Повідомлення 2

Дано коротку історичну довідку виявлення так званого ефекту аномальної спонтанної деформації (АСД). Наведено нові експериментальні та теоретичні дані щодо механізму цього ефекту. Проаналізовано стан і перспективи наукового вивчення та практичного використання цього незвичайного явища.

Ключові слова

водень, метал, фазові перетворення, аномальна спонтанна деформація, квазірідкий стан

Summary

Shapovalov V.

Solid-state casting, or the Story of discovery. Report 2

The short historical information about discovery of so-called anomalous spontaneous deformation phenomena is given. New experimental and theoretical data about the phenomena are presented. The state and perspectives of scientific investigation and commercial application of the phenomena are analyzed.

Keywords

hydrogen, metal, phase transformation, anomalous spontaneous deformation, quasi-liquid state

Поступила 21.06.11

УДК 519.711.3:517.958:681.3:669

В. А. Белый*, **В. Л. Найдек**, **С. Ю. Волков***, **Р. Я. Якобше**, **А. В. Мисочка***, **А. В. Ноговицын**,
А. А. Кучаев, **В. В. Белый***

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

*Компания «Agbor engineering Ltd», Харьков

Роль компьютерного моделирования в оптимизации технологических процессов непрерывной разливки стали. Сообщение 2**

Рассмотрены этапы разработки блочного интерфейса программы для расчета теплового поля непрерывнолитой заготовки и методика проведения исследований с целью оптимизации режимов и конструктивных параметров технологического оборудования при литье круглых и квадратных заготовок на МНЛЗ. Разработана математическая модель, описывающая процесс затвердевания прямоугольной заготовки с округленными углами. С помощью модели обнаружены особенности динамики изменения температурного поля внутри заготовки.

Ключевые слова: математическая модель, имитационная модель, МНЛЗ, оптимизация параметров, стальная заготовка, температурное поле

В работе [1] дано краткое описание математической модели, разработанной для расчета теплового состояния непрерывнолитой заготовки. В настоящей работе при разработке интерфейса программы исходили из того, что главным является обеспечение полной функциональности программы при максимальном комфорте. Для решения данной задачи необходимо: конкретизировать перечень и диапазоны варьируемых параметров; выбрать соответствующие элементы

управления Windows-интерфейса; заложить подпрограмму проверки корректности введенных данных.

Интерфейс блока № 1 (кристаллизатор)

Сведения о выбранных элементах интерфейса приведены в табл. 1.

В верхней части окна расположены вкладки, позволяющие получить доступ к элементам управления технологическими параметрами разливки и системе охлаждения кристаллизатора. В нижней части окна

** Сообщение 1 опубликовано в журнале «Металл и литье Украины» № 11, 2011 г.