

подслоя из алюминия и его сплавов и последующая ионно-плазменная обработка (ИПО) в соответствующей среде). Варьирование режимами ИПО (схема загрузки изделий в камеру, содержание в смеси активных газов, их давление, плотность тока и напряжение) позволяет формировать покрытия с различным строением и фазовым составом. Показано, что когда подслоем из Al предварительно сформирован, не надо использовать вакуумные камеры с магнетронными и электродуговыми распылителями. Отсутствие распыляемых мишеней упрощает технологию, ускоряет процесс, стабилизирует свойства покрытия по его сечению. Можно сразу формировать многокомпонентные керамические слои покрытия, расширяя спектр их характеристик. Доказано, что управление технологическими параметрами позволяет формировать структуры с большим содержанием рентгеноаморфной фазы и наноразмерными компонентами, сообщая покрытию улучшенные характеристики износостойкости. Установлена возможность изменения состава каждого осаждаемого многокомпонентного слоя и изменения структуры чередующихся слоев с высокой степенью точности. Выполнение ионно-плазменной обработки в газовой среде позволяет использовать низкую мощность разряда и избежать нагрева подложки, что формирует покрытие с повышенной трещиностойкостью и дает возможность обрабатывать изделия с низкой температурой отпуска.

УДК 669.788–699.234.002.5

### **Водородная обработка материалов: история развития и перспективы**

Гольцова М.В.

Белорусский национальный технический университет

Все виды энергетики, от атомной до водородной, в той или иной мере связаны с использованием систем металл-водород. Таким образом, исследование закономерностей взаимодействия водорода с металлами и металлическими материалами и развитие водородного материаловедения особенно актуально для Республики Беларусь в свете строительства Белорусской АЭС, а также, учитывая мировую тенденцию к широкому использованию водородной энергетики.

Водородное материаловедение состоит из двух обширных областей: водородной дегградации материалов и водородной обработки материалов. Эти области имеют противоположные цели и задачи. В первой (водородная дегградация материалов) исследуются закономерности ухудшения структуры и свойств металлов и сплавов в результате их взаимодействия с водородом.

Развитие этой области было обусловлено непредсказуемыми разрушениями химического и нефтехимического оборудования обусловленными водородной коррозией, железнодорожными и авиакатастрофами в результате флокенов и водородной хрупкости. Эта область знаний была систематизирована в ставшей классической монографии [1].

Водородная обработка материалов (далее - ВОМ) ставит своей целью улучшение структуры и свойств тех материалов, в которых положительное воздействие водорода принципиально возможно (Pd, Nb и их сплавы, сплавы типа TbFe<sub>2</sub>, NdFeB, титановые сплавы, и т.д.). Причем, первые экспериментальные данные об улучшении водородом деформируемости литых металлов были получены исследователями Цвиккером и Шляйхером при изучении водородной хрупкости титановых сплавов в конце 1950-х годов. Но только в 1970х годах были начаты систематические исследовательские работы по благоприятному влиянию водорода на технологичность титановых сплавов, а также по влиянию водородофазового наклепа на палладий и ниобий и их сплавы [2]. Теория и технология ВОМ были обобщены в монографии [3] на английском, а затем в [4] – на русском языках.

Несмотря на то, что для классического материаловедения само понятие об улучшении свойств материалов с помощью водорода звучит «крамольно», достаточно упомянуть хотя бы несколько технологий ВОМ, достигших широкого коммерческого применения, чтобы оценить широту возможностей:

1. термо-водородная обработка и водородные технологии титановых сплавов,
2. водородная обработка алюминиевого литья,
3. водородная обработка (HDDR-процесс) сплавов для постоянных магнитов,

и другие технологии, с которыми можно подробнее ознакомиться в [2 - 4]. Потребность в ВОМ будет неизбежно расти в результате постоянного увеличения в настоящее время доли «зеленой энергетики» в развитых странах.

Палладий, как модельный материал, позволяет выявить общие закономерности взаимодействия водорода с металлом. Систематические исследования различными методиками показали, что особую роль в системах металл-водород играют внутренние напряжения, индуцированные водородом в металле. Они вызывают целый ряд водородоупругих и водородопластических эффектов микро- макро- и мезомасштабов.

Сильные внутренние напряжения, индуцируемые водородом, могут приводить к необратимой пластической деформации металла, а могут

релаксировать ранее неизвестными в классическом металловедении способами, например, сдвигом зерен металла или возникновением волновых процессов в металле.

О силе возникающих водородных напряжений свидетельствует экспериментально зарегистрированный факт развития пластической деформации в области разбавленных твердых растворов водорода в палладию ( $\alpha$ -PdH<sub>x</sub>). Этот эффект может применяться на практике, например, в области разработки датчиков утечек водорода, чему будут посвящены будущие работы.

Литература

1. Колачев Б.А. Водородная хрупкость металлов. М.: Металлургия, 1985. – 216 с.
2. А.А. Ильин, Гольцова М.В. Водородная обработка материалов : исторические аспекты и теоретические основы (обзор современного состояния) // Металловедение и термическая обработка металлов. 2008, т. 50 (№5-6), стр. 261-264.
3. Progress in Hydrogen Treatment of Materials / [editor V. A. Goltsov]. – Donetsk–Coral Gables: Kassiopeya Ltd., 2001. – 543 p.
4. Альтернативная энергетика и экология (спецвыпуск журнала) 2014, №1 (141).

УДК 621.793

### **Упрочнение технологического покрытия при длительном распылении комбинированных катодов**

Ковалевский В.Н., Керженцева Л.Ф., Жук В.А.  
Белорусский национальный технический университет

Длительное распыление комбинированных катодов при магнетронном распылении сопровождается разогревом зоны эрозии катодов. Распыление идет кластерами и капельной фазой. Возможный нагрев катодов в процессе эрозии влияет на состав и однородность распыляемого потока и степень его активности. Источником питания регулировали толщину конденсата, как функцию времени и условия осаждения. Нанесение тонкопленочного покрытия на поверхности подложки, располагаемой под различным углом относительно эмиссионного потока позволило установить, что адгезия растет с увеличением угла встречи потока с подложкой до 30°, а затем падает интенсивно после 45°.

Длительное распыления одновременно Mo и C или C и Si с использованием комбинированных катодов или моно (W) катодов