



УДК 669.234.017.3:669.788
DOI: 10.21122/1683-6065-2018-4-145-154

Поступила 18.10.2018
Received 18.10.2018

ВОДОРОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЛИТЬЕ И МЕТАЛЛУРГИИ: НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ (ОБЗОР)

М. В. ГОЛЬЦОВА, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,
пр. Независимости, 65. E-mail: pmstm@bntu.by

В статье представлен обзор достижений водородной обработки материалов – области материаловедения, которая позволяет улучшить структуру и свойства материалов с помощью обратимого водородного воздействия. Показаны примеры использования водородных технологий в литье и металлургии. Термоводородная обработка (ТВО) титановых сплавов состоит из ряда последовательных операций: наводороживание металла до заданных концентраций, технологическое воздействие на металл, вакуумный отжиг для удаления водорода из металла до безопасных концентраций. ТВО позволяет пластифицировать титановые сплавы, повышает их антифрикционные свойства. В сварных соединениях сплавов титана ТВО выравнивает пластичность сварного шва и основного металла, повышает циклическую долговечность изделий в 2,0–2,5 раза. В технологиях литья предварительное наводороживание ряда алюминиевых расплавов приводит к увеличению предела прочности на 20–30%, а относительного удлинения – на 15–45%, а также к возрастанию жаропрочности после пластической деформации. С помощью водородного воздействия можно осуществлять контролируемое порошкообразование интерметаллидов, формировать в материалах наноструктуру, ускорять процессы химико-термической обработки, а также вызывать «искусственный полиморфизм» в металлах, неполиморфных по своей природе.

Сделан вывод о том, что часть водородных технологий уже коммерциализирована, часть еще ожидает широкого применения. В целом перспективы развития водородной обработки материалов лежат в сфере развития применения систем металл–водород, а международная активность, в частности, школы и конференции, традиционно и регулярно проводимые по этой тематике, позволяют судить о интенсивном развитии теории и практики водородных технологий.

Ключевые слова. Водородная обработка материалов, термоводородная обработка титановых сплавов, алюминиевое литье, порошковая металлургия, системы металл–водород.

Для цитирования. Гольцова, М. В. Водородные технологии в литье и металлургии: настоящее и будущее (обзор) / М. В. Гольцова // Литье и металлургия. 2018. № 4. С. 145–154. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-4-145-154.

HYDROGEN TECHNOLOGIES IN FOUNDRY AND METALLURGY: CURRENT STATE AND PERSPECTIVES (REVIEW)

М. V. GOLTSOVA, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.
E-mail: pmstm@bntu.by

The article presents an overview of achievements of hydrogen treatment of materials, – the field of materials science, which makes possible improvement of materials structure and properties with the help of a reversible hydrogen effect. Examples of the hydrogen technologies use in casting and metallurgy are shown. Thermohydrogen processing (THP) of titanium alloys consists of a number of successive operations: hydrogenation of the metal to specified concentrations, technological action on the metal, vacuum annealing to remove hydrogen from the metal to safe concentrations. THP allows plasticizing titanium alloys, increasing their antifriction properties. In welded joints of titanium alloys, the THP equalizes the plasticity of the welded joint and the base metal, increases the cyclic life of the products by 2–2.5 times. In the technologies of casting, the preliminary hydrogenation of a number of aluminum melts leads to an increase in the strength limit by 20–30%, and the relative elongation by 15–45%, and also increasing heat resistance after plastic deformation. With the help of hydrogen, it is possible to carry out controlled powdering of intermetallic compounds, to form nanostructures in materials, to accelerate the processes of chemical-thermal treatment, and to cause «artificial polymorphism» in metals that are not polymorphic by its nature.

It is concluded that some of hydrogen technologies have already been commercialized, some are still waiting for wide use. In general, the prospects for the development of hydrogen processing of materials lie in the development of the application of metal–hydrogen systems, and international activity (in particular, schools and conferences), traditionally and regularly held on this topic, allow us to judge the intensive development of the theory and practice of hydrogen technologies.

Keywords. Hydrogen treatment of materials, thermohydrogen processing of titanium alloys, aluminum casting, powder metallurgy, metal–hydrogen systems.

For citation. Goltsova M. V. Hydrogen technologies in foundry and metallurgy: current state and perspectives (review). Foundry production and metallurgy, 2018, no. 4, pp. 145–154. DOI: 10.21122/1683-6065-2018-4-145-154.

Введение

Водород является самым распространенным химическим элементом, ему присущи малый атомный диаметр и высокий коэффициент диффузии в материалах даже при очень низких температурах, он практически всегда присутствует в сталях и других металлических материалах. До недавнего времени слово «водород» несло в себе только негативное значение для специалистов-металловедов, поскольку с ним связана водородная деградация – обширный термин, включающий в себя разнообразие видов ухудшения структуры и свойств материалов под влиянием водородного воздействия [1].

Впервые сама возможность положительного влияния водорода на металлы была открыта в 50-х годах XX столетия при изучении деформируемости титановых сплавов [2]. За прошедшие с того времени более чем 60 лет эта возможность трансформировалась в отдельную область науки и технологии – водородную обработку материалов (ВОМ). За последние годы количество разработок и публикаций в этой области только увеличивается. Основные положения теории ВОМ обобщены в [3, 4]. Некоторые физические расчеты взаимодействия водорода с ГЦК- и ОЦК-металлами с образованием гидридов в рамках нанокластерной теории физики твердого тела представлены в обзорной работе [5]. В настоящей статье рассмотрены основы некоторых технологий водородной обработки, представляющие положительный интерес для процессов производства и использования металлов.

Термоводородная обработка титановых сплавов

Титановые сплавы по праву занимают ведущее место в науке и технологии, совмещая малую плотность, высокую прочность, коррозионную стойкость, жаропрочность и даже, для ряда титановых сплавов, биологическую совместимость с организмом человека. Что касается водородного воздействия, то отметим, что титан весьма склонен к водородной хрупкости [6]. Важно, что превышение установленных норм содержания водорода в сплаве (выше уровня 0,002–0,003 мас.%) уже приводит к замедленному разрушению конструкций в процессах эксплуатации [7]. Тем удивительнее, что найдены условия, при которых технологическое воздействие водородом пластифицирует титан, облегчая его деформируемость. Эти условия систематически изучались в работах ученых как дальнего зарубежья (U. Zwicker, F. H. Froes, O. Senkov и др.), так и российских ученых, представителей московской школы (Б. А. Колачев, А. А. Ильин, В. К. Носов, А. М. Мамонов, Е. Г. Понятовский, В. Е. Антонов), уральской школы (А. А. Попов) и др. [3].

В этом плане целесообразно подчеркнуть, что наиболее значительный вклад в разработку технологий термоводородной обработки изделий из титана внесли академик Российской академии наук, профессор Московского авиационно-технологического института А. А. Ильин и его школа. К настоящему времени накопленный опыт использования водорода как постоянного или временного легирующего элемента в титановых сплавах и сформулированные представления о влиянии водорода на фазовые и структурные превращения уже находят свое широкое практическое применение в целом ряде водородных технологий титановых сплавов [8–11]. При этом водородные технологии позволяют снизить металлоемкость и энергетические затраты титанового производства, обеспечивают эксплуатационную надежность титановых деталей и конструкций, а в ряде случаев – уникальное сочетание свойств, не достижимое никакими другими способами обработки [9].

Термоводородная обработка (ТВО) титана включает в себя водородное пластифицирование для повышения технологичности титановых сплавов и термоводородную обработку для формирования в полуфабрикатах и изделиях оптимального структурного состояния и состоит, согласно [10], из ряда последовательных операций:

- 1) исходное наводороживание металла до заданных концентраций водорода;
- 2) технологическое воздействие на металл;
- 3) вакуумный отжиг для удаления водорода из металла до безопасных концентраций.

Водород при наводороживании титановых сплавов приводит к комплексному влиянию на их структуру и свойства: во-первых, благодаря понижению температуры фазового превращения As_3 увеличивается количество β -фазы, что приводит к перераспределению легирующих элементов между фазами. В результате повышается способность сплава титана к пластической деформации [9]. Именно поэтому на данном этапе обработки целесообразно проводить технологические операции деформации сплавов титана. К другим возможностям водородного воздействия относится неодинаковое изменение удельных объемов α - и β -фазы титана, что дает возможность управлять морфологией и размерами α -фазы, а также в результате сильного различия коэффициентов диффузии водорода и легирующих элементов осуществ-

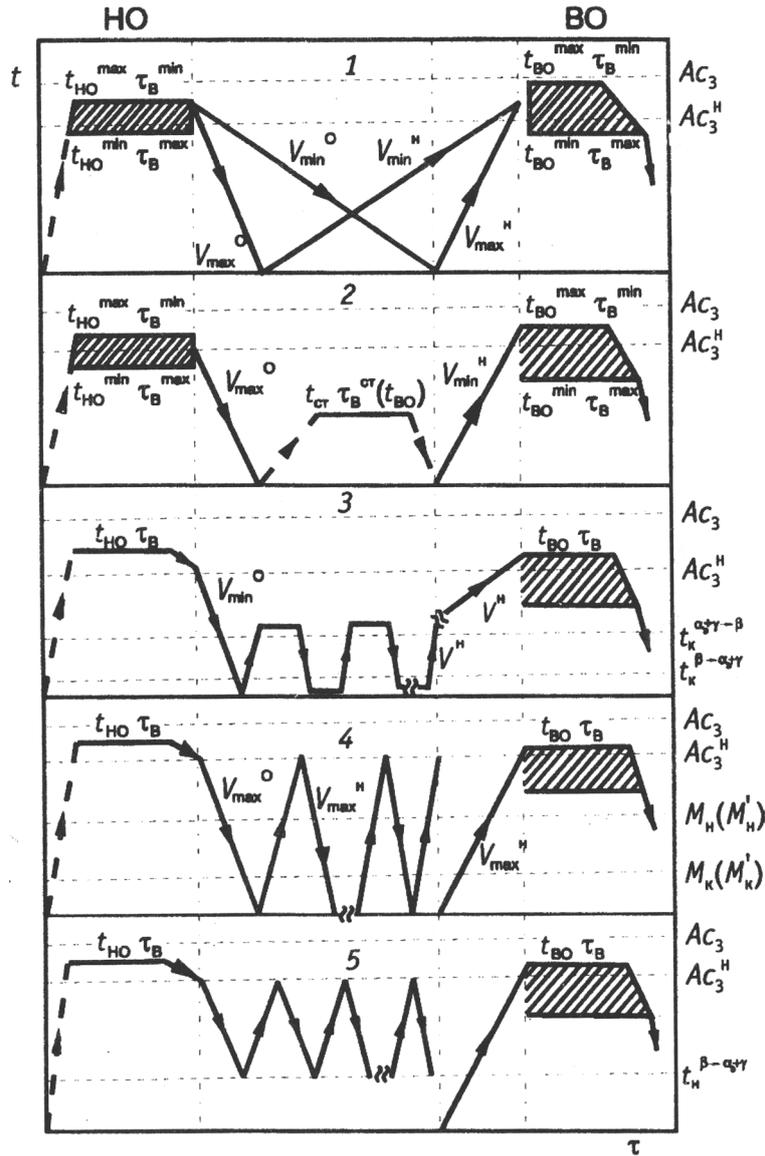


Рис. 1. Схемы ТВО титановых сплавов [7]: НО – наводороживание; ВО – вакуумный отжиг

влять управление конечной структурой α - и псевдо- α -сплавов, создавая путем управляемого превращения стабилизированной β -фазы в гетерофазную структуру с различной морфологией и размерами структурных составляющих [9].

Примеры схем ТВО приведены на рис. 1 [7]. Каждая из них имеет свои особенности. Например, схема 1 – на атермическом распаде водородсодержащей β -фазы; схема 2 – на фиксации в структуре сплава максимального количества β -фазы с последующим старением, схема 3 – на эвтектоидном распаде наводороженной β -фазы в процессе термоциклирования, схема 4 – на термоциклирующей обработке, обеспечивающей многократное протекание прямого и обратного мартенситного превращения. Схема 5 обеспечивает в результате термоциклирования многократное $\beta \leftrightarrow \alpha$ диффузионное превращение.

Практически все схемы ТВО титановых сплавов включают вакуумный отжиг. Эта заключительная операция проводится с целью удаления водорода из изделия или полуфабриката, чтобы гарантированно предупредить водородную хрупкость при последующей эксплуатации. С точки зрения управления фазово-структурным состоянием наибольший интерес представляет низкотемпературный вакуумный отжиг титановых сплавов (600–650 °С) [12].

Результаты, которые дает ТВО титановых сплавов, вполне оправдывают затраты на ее проведение. Так, в работе [13] авторы отмечают, что экономнолегированные ($\alpha + \beta$)-титановые сплавы и, в частности сплав ВТ6, термически упрочняются слабо после традиционных методов пластической деформации, так как в них формируется структура, не обеспечивающая достаточную твердость. В то же время при обратном легировании водородом имеет место образование структуры с размером зерен меньше одного

микрона, что позволяет повысить прочностные характеристики этих материалов. В этой же работе [13] представлены результаты экспериментов, показывающие, что предшествующая диффузионному азотированию ТВО сплава ВТ-6 усиливает эффект поверхностного упрочнения и улучшает качество азотированной поверхности, что приводит к повышению антифрикционных свойств сплава ВТ6 при трении (без смазки или с 0,9% NaCl) в паре со сталью 12X18H10T (сплав ВТ-6 используется как материал для эндопротезов суставов человека и ТВО широко применяется при их производстве [14]).

Кроме ТВО титановых сплавов, для эндопротезов разработаны и совершенствуются водородные технологии холодной листовой прокатки и холодной листовой формовки изделий из высокопрочных титановых сплавов ВТ22И и Ti-10-2-3; водородная технология теплой листовой прокатки жаропрочных сплавов ВТ20 и ВТ25У; водородная технология горячей пакетной листовой прокатки фольги из жаропрочного интерметаллидного титанового сплава на основе α -фазы [15].

Комплексные исследования водородных технологий для получения деформированных полуфабрикатов [15] и изделий из ряда титановых сплавов показали, что водородные технологии обеспечивают проведение формообразующих операций по интенсифицированным режимам при температурах на 100–120 °С ниже серийных технологических процессов. Важно, что рассчитанная, по данным на 2011 год, себестоимость ТВО в промышленных условиях [15] не превышала 350 российских рублей на килограмм обрабатываемого металла.

Водородная обработка в литейном производстве

В производстве алюминиевого литья водород играет важную роль: например, с одной стороны, пористость отливок, вызываемая присутствием в жидком металле газов, приводит к сильному снижению прочности металла (в некоторых случаях на 25%). Относительное удлинение зараженного порами металла может снизиться на 45–50%, другие механические свойства литого металла при наличии пористости также ухудшаются. С другой стороны, еще в 2008 г. в работе Ф. М. Котлярского и Г. П. Борисова [16] на основе анализа 95 литературных источников было показано, что существуют два вида положительного влияния водорода на качества алюминиевых сплавов. При этом важно, где находится водород: в виде газовой фазы или в растворе.

Совместное легирование сплава Д16 водородом, ванадием и церием приводит к повышению его прочности на 20–30% как в деформированном, так и в термически обработанном состоянии. Упрочнение после горячей прокатки сплава АМг2 при совместном легировании водородом, кальцием и лантаном достигло значений 40–65%. При этом пластичность оставалась в обоих приведенных примерах на достаточно высоком уровне [16, с. 443].

Нужная концентрация водорода в алюминиевых сплавах обеспечивается разными способами наводороживания шихты. Так, для сплавов Al-11%Mg и Al27-1 используется предварительное наводороживание магния. Это обеспечивает повышение пластичности и прочности [16, 17]. Предварительное наводороживание путем обработки расплава паром длительностью от 5 до 25 мин приводит к увеличению предела прочности на 20–30%, а относительного удлинения – на 15–45% для сплавов Al-5%Cu, Al-7%Cu, Al-3%Fe, Al-2,4%Fe. Резкое повышение прочности и пластичности объясняется тем, что в оптимальном количестве водород изменяет форму и характер распределения фаз Mg_3Al_2 , $CuAl_2$, а также уменьшает величину α -зерен [16]. Такое сильное изменение свойств достигалось также и в сплавах Al-Ti, Al-Si, Al-Ni. При этом наводороживание шихты приводило также к возрастанию жаропрочности после пластической деформации. Подробности формирования структуры и свойств наводороженных алюминиевых отливок приведены в [18, 19].

Водородные технологии в литейном производстве учитывают особенности взаимодействия конкретного материала с водородом. Интересно, что водородная технология титановых отливок, основанная на контролируемой водородной хрупкости титановых сплавов, позволяет механизировать операции отделения элементов литниково-питающей системы и прибылей от отливок. Это существенно повышает производительность труда (подробно см. в [9], с. 345–352). Сложность разработки такой технологии состоит в необходимости локализации водорода в необходимых участках отливки, что является нетривиальной задачей вследствие высокой диффузионной подвижности водорода в металле.

Водородная обработка и порошковая металлургия

С помощью водородного воздействия можно осуществлять контролируемое порошкообразование исходно хрупких интерметаллидов. В работе [20] проводили водородную обработку порошка из частиц

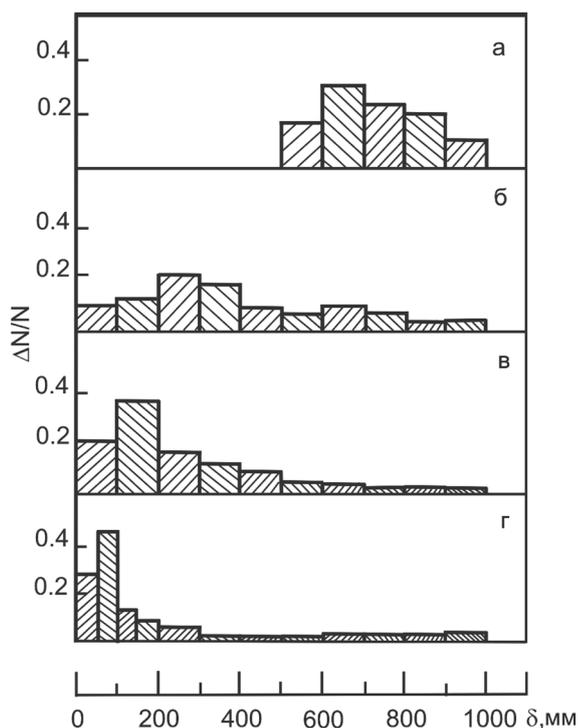


Рис. 2. Изменение распределения частиц порошка LaNi_5 по линейному размеру (δ) как функция скорости повышения давления водорода v (цитируется по [21]): $\Delta N/N$ – пропорциональность частиц определенного размера в области ($\Delta\delta$), близкой к заданной δ ; a – начальное распределение; $b - v = 1,1 \cdot 10^{-3}$; $v - v = 2 \cdot 10^2$; $z - v = 1,0 \text{ МПа} \cdot \text{с}^{-1}$

$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{V}$ после водородной обработки варьируется от 0,3 мкм до критического размера одиночного домена, который для $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{V}$ составляет 0,24 мкм. Суть производственного HDDR-процесса состоит в следующем. При достаточно высоких температурах (600–900 °С) исходный сплав насыщается водородом (стадия *hydrogenation*) и в результате измельчается, так как объем решетки $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{V}$ при этом увеличивается на ~4,8%.

Далее на стадии *disproportionation* $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{VH}_x$ подвергается фазовому превращению с образованием $\alpha\text{-Fe}$, гидрида неодима и фазы Fe_2V . В заключение осуществляют вакуумирование (*dehydrogenation*). При дегазации водорода происходит спекание образовавшегося порошка (*recombination*), но рекомбинированный сплав обладает уже измельченной структурой и улучшенными магнитными свойствами [23, 24].

Другое направление использования интерметаллидов в водородных технологиях – разработка сплавов-накопителей водорода как безопасного способа хранения водорода [25] для нужд водородной энергетики.

В настоящее время происходит бурное развитие таких областей науки и техники, как наноструктурные материалы, нанотехника, нанотехнологии [5]. Водородная обработка оказывается прогрессивной и в этих новых областях науки: к настоящему времени уже опубликованы работы, в которых показано, что с помощью водородного воздействия возможно формирование в материалах наноструктуры, например, [25].

Водород в процессах химико-термической обработки

Водород в процессах химико-термической обработки (ХТО) оказывает существенное влияние как на «внешний» процесс, так и на взаимодействие частиц с насыщаемой поверхностью [27–30]. Во-первых, и это подчеркивали авторы многочисленных работ, систематизированных в [30], здесь также имеет место двойственное влияние водородного воздействия: в одних случаях, ХТО в присутствии водорода приводила к увеличению толщины науглероженного слоя, в других – к его уменьшению. Причина этой двойственности заключается в том, что влияние водорода зависит от действия многих факторов, среди которых есть как факторы внешних условий (длительность воздействия, процент содержания водорода

LaNi_5 исходно одинакового размера: при 20 °С в рабочую камеру установки напускали водород до определенного давления и с контролируемой скоростью. После выдержки различной длительности образцы нагревали до 300 °С, водород откачивали из рабочей камеры и измельченные образцы охлаждали. Такая последовательность составляла один цикл водородной обработки, число циклов в экспериментах также варьировали. Результаты показали, что дисперсность порошков, получаемых в результате водородной обработки исходно хрупких интерметаллидов типа LaNi_5 , **можно полностью контролировать** путем варьирования скорости подачи водорода, конечного давления водорода, длительности воздействия и числа циклов обработки [20]. Результаты обработки представлены на рис. 2. Из рисунка видно, что распределение по размерам измельченных частиц порошка LaNi_5 является функцией повышения давления водорода (цитируется по [21]). Таким образом, водородная обработка позволяет управлять процессом порошкообразования исходно **хрупких** интерметаллидов.

В настоящее время коммерциализация технологий производства порошков из редкоземельных сплавов типа $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{V}$ для постоянных магнитов достигла вполне высокого уровня. Это так называемый HDDR-процесс (от английских слов *hydrogenation–disproportionation–dehydrogenation–recombination*), который позволяет из литых компактных сплавов получить мелкодисперсный **высококоэрцитивный** порошок. По данным [22], размер зерен

в газовой среде), так и строение материала (его состав и структура). Интересно, что влияние водородного воздействия на инициирование диффузионных процессов показывает, что только при определенных концентрациях водорода в металле (от 36 до 52%) оно приводит к максимальному формированию науглероженного слоя. При этом водород выступает в роли активного элемента, активизирующего процессы самодиффузии. Важно, что тип источника тепла имеет существенное значение: например, при использовании концентрированных источников тепла (плазменная, лазерная обработка) содержание водорода в титане, железе и никеле может возрасти примерно в 2 раза по сравнению с классическими способами нагрева.

Необходимо подчеркнуть, что при осуществлении ХТО необходим точный контроль чистоты водорода. Напомним, что технический водород может содержать N_2 , CH_4 , CO и другие примеси, наличие которых при повышенных температурах даже может приводить к непланируемому науглероживанию поверхностного слоя сталей 12ХМ1, 15Х5М [30].

Отметим, что производство и отжиг магнитомягких материалов (и некоторых других специальных сталей) требует использовать для отжига водород **ультравысокой** чистоты, который может быть получен пока только одним единственным путем – путем проникновения водорода через сплошные палладиевые мембраны в виде, трубок, мембран и т. д.

Водородная обработка сварных соединений

Этот тип водородной обработки используется для производства сварных соединений тех металлов и сплавов, чья структура и свойства могут быть улучшены с помощью водородного воздействия. Например, обычная термическая обработка сварных швов титановых сплавов не может полностью ликвидировать неоднородность структуры и механических свойств различных зон сварных соединений. Кроме того, комплекс механических свойств сварных швов титановых сплавов, как это часто и бывает в металлах со сварными соединениями, в целом понижен по сравнению с механическими свойствами основного металла. Наводораживающий отжиг и регламентированное по скорости охлаждение сварных швов сплава ВТ20 [31] приводят к формированию во всех зонах мелкодисперсной структуры, содержащей α -, β - и γ -фазы. Последующий вакуумный отжиг удаляет водород из сплава, при этом фазовый состав зоны шва после вакуумного отжига составляет смесь фаз: α -фазу+ 8–9% β -фазы. Повышение температуры вакуумного отжига приводит к укрупнению пластин α -фазы, снижению временного сопротивления разрыву сплава, но одновременно происходит выравнивание характеристик пластичности шва и основного металла. Поэтому для сварных швов сплава ВТ20 наилучший эффект оказывает ТВО с вакуумным отжигом при 800°C.

ТВО с вакуумным отжигом показывает также хорошие результаты для сварки фасонных отливок титановых сплавов. Например, приведенные в [32] данные по обработке швов сплавов ВТ6Л, полученных аргонодуговой сваркой, показывают, что во всех зонах сварного соединения происходит резкое измельчение внутризеренной структуры при неизменности размеров зерна. Этот эффект сопровождается упрочнением материала и повышением сопротивления усталости. В целом для сплава ВТ6Л прочность сварного соединения в результате ТВО возрастает на 20%, значения пластичности и ударной вязкости сохраняются на том же уровне, циклическая долговечность увеличивается в 2,0–2,5 раза [31]. Следовательно, при сохранении всех преимуществ фасонного литья ТВО позволяет получить качественные сварные соединения.

Причина эффективности ТВО сварных соединений сплавов титана заключается в том, что этот вид обработки по своей специфике захватывает как структуры самого сварного соединения, так и структуры зоны термического влияния [33].

Водородная обработка мембранных сплавов для получения особо чистого водорода

Только металлические палладиевые мембраны позволяют получить водород со степенью чистоты 99,9999% [34]. Такой водород необходим для производства полупроводников, применения в термоядерной энергетике, пищевой, фармацевтической, металлургической промышленности и некоторых других отраслях, в физических и химических экспериментах; для реализации тонкой очистки, удаления и разделения изотопов водорода в отдельных узлах термоядерных реакторов и др. Работа палладиевых мембран основана на уникальной скорости диффузии в кристаллической решетке палладия. Именно поэтому палладиевая мембрана пропускает водород, но задерживает проникновение всех других примесей. Для работы мембранных аппаратов были созданы специальные сплавы на основе палладия, однако они,

как и сам палладий (и как многие другие металлы – Nb, Ta, V) не обладают природным полиморфизмом. Однако водородное воздействие вызывает в палладии и его сплавах «искусственный» полиморфизм [35–37]. Соответственно путем гидридных фазовых превращений можно осуществлять в палладии и его сплавах водородофазовый наклеп (ВФН), добиваясь управляемого упрочнения металла, изменения его структуры и всего комплекса физических свойств. Явление ВФН было детально изучено не только на палладии, но и на ниобии, обладающем гораздо более сложной, чем Pd, диаграммой состояния Nb–H. Подробно об этом явлении можно прочитать в недавно опубликованной коллективной монографии [38]. Там же [38] представлены результаты фундаментальных исследований взаимодействия водорода с палладием как с классическим модельным материалом для изучения основных закономерностей взаимодействия водорода с металлами. Показано сколь значительна роль особенностей процессов диффузии водорода и вызываемых им структурно-фазовых превращений, а также микро- и макроскопических формоизменений конкретных изделий в развитии внутренних напряжений, индуцированных водородом, обеспечивающих надежность работы палладиевых диффузионных мембран.

Перспективы развития водородных технологий

Как известно, технология (обобщенно) есть в целом «совокупность приемов и способов получения, обработки или переработки сырья, материалов, полуфабрикатов или изделий», используемых в различных областях промышленности и жизни человечества. И в то же время технология обобщенно есть «научная дисциплина, разрабатывающая и совершенствующая» эти приемы и способы достижения поставленных целей [39]. Технология в целом должна быть рациональной, экономически и экологически обоснованной и, в конечном итоге, «красивой» [40]. Несомненно, что описанные в настоящем обзоре водородные технологии обладают всеми перечисленными свойствами. Часть из них уже нашли свое применение. Так, достаточно широко уже используется ТВО титановых сплавов для имплантатов, HD-DR-процесс, водородная обработка сварных соединений, получение сверхчистых изотопов водорода в термоядерной энергетике и т. д. Другие водородные технологии еще найдут свое широкое внедрение в производстве.

Некоторые суперсовременные технологии, например, термоядерный синтез, обещающий избавить человечество от энергетических забот, совершенно невозможны без технологии получения абсолютно чистых изотопов водорода. На сегодня (да и в будущем) изотопы водорода такой чистоты могут быть получены только одним единственным путем – диффузией через палладиевые мембраны. Отсюда очевидна абсолютная важность для человечества водородной мембранной технологии.

В целом перспективы развития водородной обработки материалов и ее будущего широкого применения обусловлены общим развитием науки и техники. В заключение подчеркнем, что эта проблема составляет предмет традиционных международных конференций, проводимых уже в течение 40 лет с периодичностью один раз в два года. Примеры изданных научных материалов конференций можно найти в [41–44]. В конечном итоге, развитие и дальнейшее внедрение водородных технологий в жизнь является неизбежным и важным этапом развития науки и в целом техники и будет определяться направленностью работы общемирового технологического процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Колачев Б. А.** Водородная хрупкость металлов / Б. А. Колачев. М.: Металлургия, 1985. 216 с.
2. **Zwicker U., Schleicher H. W.** Process for improving the workability of titanium alloys. US Patent 2892742 (1959). Электронный ресурс Google Patents <https://patents.google.com/patent/US2892742>
3. **Progress in Hydrogen Treatment of Materials.** Donetsk–Coral Gables: Kassiopeya Ltd., 2001, 543 p.
4. **Альтернативная энергетика и экология.** Международный научный журнал. Спецвыпуск, 2014, 238 с.
5. **Гречихин Л. И.** Наночастицы и нанотехнологии // Нано- и микростистемная техника. 2008. С. 2–26. URL: <http://www.microsystems.ru/files/full/mc200805.pdf>
6. **Ливанов В. А.** Водород в титане / В. А. Ливанов, А. А. Буханова, Б. А. Колачев. М.: Металлургиздат, 1962. 245 с.
7. **Илларионов А. Г.** Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учеб. пособ. / А. Г. Илларионов, А. А. Попов. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014, 137 с.
8. **Колачев Б. А.** Достижения водородной технологии титановых сплавов / Б. А. Колачев, А. А. Ильин, В. К. Носов, А. М. Мамонов // Технология легких сплавов. 2007. № 3. С. 10–26.
9. **Ильин А. А.** Водородная технология титановых сплавов / А. А. Ильин, Б. А. Колачев, В. К. Носов, А. М. Мамонов / Под общ. ред. А. А. Ильина. М.: МИСиС, 2002, 392 с.
10. **Ильин А. А.** Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах. М.: Наука, 1994, 304 с.
11. **Ильин А. А.** Управление структурой титановых сплавов методом термоводородной обработки / А. А. Ильин, С. В. Скворцова, А. М. Мамонов // Физико-химическая механика материалов. 2008. № 3. С. 28–34.

12. **Скворцова С. В.** Влияние водорода на фазовые и структурные превращения в титановом сплаве ВТ6 / С. В. Скворцова, П. В. Панин, Н. А. Ночовная [и др.] // Электронный ресурс Всероссийского науч.-исслед. ин-та авиационных материалов URL: <https://www.viam.ru/public/index.php?year=2010>.
13. **Погрелюк И. Н.** Антифрикционные характеристики титанового сплава ВТ6 после термоводородной обработки и последующего азотирования / И. Н. Погрелюк, С. В. Скворцова, В. Н. Федирко [и др.] // Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2015. Т. 51. № 3. С. 90–99.
14. **Карпов В. Н.** Материаловедческие и технологические аспекты проектирования высоконагруженных имплантатов из титановых сплавов / В. Н. Карпов, А. М. Мамонов, В. С. Спектор [и др.] // Титан. 2014. № 4. С. 43–51.
15. **Овчинников А. В.** Обоснование и разработка водородной технологии производства деформированных полуфабрикатов из титановых сплавов: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2011. 46 с.
16. **Котлярский Ф. М.** О двойственной роли водорода в процессах формирования отливок из алюминиевых сплавов / Ф. М. Котлярский, Г. П. Борисов // 50 лет в Академии наук Украины. Киев: Редакция журнала «Процессы литья», 2008, 500 с.
17. **Афанасьев В. К.** Влияние деформации в твердом состоянии и наводороживания шихты на свойства отливок из алюминиевых сплавов / В. К. Афанасьев, А. Н. Прудников // Литейное производство. 1988. № 9. С. 12–13.
18. **Котлярский Ф. М.** Влияние водорода на формирование и свойства отливок из алюминиевых сплавов, заливаемых при низком перегреве / Ф. М. Котлярский, В. И. Белик, Г. П. Борисов // Процессы литья. 2014. № 3 (105). С. 10–22.
19. **Афанасьев В. К., Попова М. В.** Применение водорода для получения необходимых свойств алюминиевых сплавов // Водородная обработка материалов; Тр. Четвертой Междунар. конф. «ВОМ-2004», Донецк: ДонНТУ, Дон ИФЦ ИАУ, 2004. С. 243–245.
20. **Гольцов В. А.** Разрушение металлических материалов под воздействием водорода / В. А. Гольцов, А. Ф. Волков, Л. И. Смирнов, Е. И. Гринченко // Физика твердого тела. 1986. С. 57–61.
21. **Гольцов В. А.** Фундаментальные основы водородной обработки материалов // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 1. С. 42–69.
22. **Вербецкий В. Н.** Изучение влияния процесса HDDR на морфологию интерметаллида $Nd_2Fe_{14}B$ / В. Н. Вербецкий, С. В. Митрохин, А. А. Тепанов, Э. А. Мовлаев // Методическое руководство. М.: МГУ, 2017. 12 с. <http://www.chem.msu.ru/rus/teaching/highp/HDDR.pdf>
23. **Kianvash Abbas, Harris I. R.** Hydrogen decrepitation as a method of powder preparation of a 2:17-type, Sm (Co, Cu, Fe, Zr)_{8.92} magnetic alloy // J. Mater. Sci. 1985. Vol. 20. P. 682. <https://doi.org/10.1007/BF01026543>.
24. **Sugimoto S., Book D.** HDDR Process for the Production of High Performance Rare-Earth Magnets // Handbook of Advanced Magnetic Materials, Springer, US, 2006, p. 977–1007. DOI: 10.1007/1-4020-7984-2_23.
25. **Каракозов Б. К.** Интерметаллиды на основе системы Ti–Al–Nb для хранения водорода / Б. К. Каракозов, М. К. Скаков, Ш. Р. Курбанбеков, А. А. Ситников // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные покрытия, сварка: материалы 13-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск 16–18 мая 2018 г. Минск: Беларуская навука, 2018. С. 190–191.
26. **Булик I. I.** Водень як технологічне середовище для формування наноструктури у феромагнітних Sm–Co сплавах / I. I. Булик, В. В. Панасюк // Фіз. хім. механіка матеріалів. 2012. № 1. С. 9–18.
27. **Исследование** влияния водорода и кислорода на процессы азотирования и цементации металлов и сплавов с целью оптимизации условий их химико-термической обработки. Донецк: ДонНУ, 2003. 82 с.
28. **Изучение** зависимости водородно-стимулированной диффузии от состава сплавов на железной основе при ХТО концентрированными потоками энергии. Донецк, 1996. 56 с.
29. **Изучение** основных закономерностей водородо-стимулированной диффузии в металлах и сплавах: Разработка механизма основных процессов водородо-стимулированной диффузии в металлах и сплавах. Практические рекомендации. Донецк, 1997. 145 с.
30. **Барьяхтар В. Г.** Водород в диффузионных процессах химико-термической обработки металлов и сплавов / В. Г. Барьяхтар, Ю. М. Буравлев, А. Г. Милославский, М. П. Кушнир; Под ред. Ю. М. Буравлева. Киев: Наукова думка, 1999. 253 с.
31. **Лясоцкая В. С.** Термическая обработка сварных соединений титановых сплавов. М.: Экомет, 2003. 352 с.
32. **Ильин А. А.** Термоводородная обработка сварных соединений из титановых сплавов / А. А. Ильин, И. С. Польшкин, А. А. Мамонов [и др.] // Технология легких сплавов. 2002. № 3. С. 5–12.
33. **Мальков А. В.** Термоциклическая обработка титановых сплавов с использованием водородного наклепа / А. В. Мальков, И. Д. Низкин, В. В. Шевченко // ФХММ. 1991. № 1. С. 109–112.
34. **Goltsova M. V.** Platinum metals key role in hydrogen economy progress and the fundamentals of hydrogen palladium membrane technology / M. V. Goltsova, V. V. Vasekin, G. I. Zhiron // Proceedings International Hydrogen Energy Congress and Exhibition, IHEC-2007, Istanbul, Turkey, 13–15 July, CD/IHEC07-0967.pdf, 10 pp.
35. **Гольцов В. А.** Индуцированный водородом полиморфизм и фазово-структурные основы водородной обработки материалов / В. А. Гольцов, М. В. Гольцова // Вестн. Пермского нац. исслед. политехн. ун-та. Машиностроение, материаловедение. 2016. Т. 18. № 3. С. 7–29.
36. **Гольцов В. А.** Индуцированный водородом полиморфизм металлов и основы водородной обработки материалов (обзор) / В. А. Гольцов, М. В. Гольцова // Сб. материалов 60-й Междунар. науч. конф. «Актуальные проблемы прочности». Витебск, Беларусь. 14–18 мая 2018 г. С. 28–30.
37. **Гольцова М. В.** Полиморфизм металлов, индуцированный водородом, как основа водородной обработки материалов / М. В. Гольцова, В. А. Гольцов // Сб. докл. Междунар. симпозиума «Технологии. Оборудование. Качество». Минск: БНТУ, 29 мая – 1 июня 2018 г. С. 162–163.
38. **Гольцова М. В., Жиров Г. И.** Основы водородной обработки материалов (обзор) // Актуальные проблемы прочности. В 2-х т. Т. 2 / Под ред. В. В. Рубаника. Витебск: УО «ВГТУ», 2018, 512 с. Гл. 16. С. 329–352.
39. **Большая** советская энциклопедия. Электронный ресурс. URL: <http://bse.sci-lib.com/article110425.html>.
40. **Букин В. И.** Переработка производственных отходов и вторичных сырьевых ресурсов, содержащих редкие, благородные и цветные металлы / В. И. Букин, М. С. Игумнов, В. В. Сафонов, Вл. В. Сафонов. М.: Изд. ООО «Издательский дом «Деловая столица», 2002. 224 с.

41. **Взаимодействие** изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'15 JUNIOR // Сб. докл. Десятой Междунар. школы молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова / Под ред. д-ра техн. наук А. А. Юхимчука, 2016, 300 с. URL: <http://book.sarov.ru/product/ihism-15/#s3>.
42. **Special Issue** on The 21st World Hydrogen Energy Conference (WHEC 2016), 13–16 June 2016, Zaragoza, Spain / Edited by Edited by Luis Carlos Correas, Ángel Larrea, María Jesús Lázaro, José Ángel Peña // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42, No. 19. P. 13309–14044.
43. **Special Issue** on The 15th International Symposium on Metal–Hydrogen Systems (MH2016). 7–12 August 2016, Interlaken, Switzerland / Edited by Shin-ichi Orimo // International Journal of Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42. No. 35. P. 22303–22640.
44. **HYdrogen** POver THEoretical and Engineering Solutions – International Symposium (Hypothesis XII) / Edited by Angelo Basile, Gaetano Squadrato, Giuseppe Spazzafumo // International Journal of Hydrogen Energy. 2018. Vol. 43. No. 26. P. 11653–11902.

REFERENCES

1. **Kolachev B. A.** *Vodorodnaja hrupkost' metallov* [Hydrogen embrittlement of metals]. Moscow, Metallurgija Publ., 1985, 216 p.
2. **Zwicker U., Schleicher H. W.** Process for improving the workability of titanium alloys. US Patent 2892742 (1959). <https://patents.google.com/patent/US2892742>.
3. **Progress** in Hydrogen Treatment of Materials. Donetsk–Coral Gables: Kassiopeya Ltd., 2001, 543 p.
4. **Al'ternativnaja** jenergetika i jekologija [Alternative energy and ecology]. *Nezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal = International scientific journal*, special issue, 2014, 238 p.
5. **Grechihin L. I.** Nanochasticy i nanotehnologii [Nanoparticles and nanotechnology]. *Nano- i mikrostistemnaja tehnika = Nano and microsystem technique*, 2008, pp. 2–26. URL: <http://www.microsystems.ru/files/full/mc200805.pdf>
6. **Livanov V. A., Buhanova A. A., Kolachev B. A.** *Vodorod v titane* [Hydrogen in titanium]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1962, 245 pp.
7. **Illarionov A. G., Popov A. A.** *Tehnologicheskie i jekspluatacionnye svojstva titanovyh splavov* [Technological and exploitative properties of titanium alloys]. Ekaterinburg, Ural. Univ. Publ., 2014, 137 p.
8. **Kolachev B. A., P'in A. A., Nosov V. K., Mamonov A. M.** Dostizhenija vodorodnoj tehnologii titanovyh splavov [Achievements of hydrogen treatment of titanium alloys]. *Tehnologija legkih splavov = Technology of lightweight*, 2007, no. 3, pp. 10–26.
9. **P'in A. A., Kolachev B. A., Nosov V. K., Mamonov A. M.** *Vodorodnaja tehnologija titanovyh splavov* [Hydrogen technology of titanium alloys]. Moscow, MISIS Publ., 2002, 392 p.
10. **P'in A. A.** *Mehanizm i kinetika fazovyh i strukturnyh prevrashhenij v titanovyh splavah* [Mechanism and kinetics of phase and structural transformations in titanium alloys]. Moscow, Nauka Publ., 1994, 304 p.
11. **P'in A. A., Skvorcova S. V., Mamonov A. M.** Upravlenie strukturaj titanovyh splavov metodom termovodorodnoj obrabotki [Control of structure of titanium alloys by method of thermohydrogen treatment]. *Fiziko-himicheskaja mehanika materialov = Physico-chemical mechanics of materials*, 2008, no. 3, pp. 28–34.
12. **Skvorcova S. V., Panin P. V., Nochovnaja N. A. et al.** *Vlijanie vodoroda na fazovye i strukturnye prevrashhenija v titanovom splave BT6* [Hydrogen effect on phase and structural transformations in titanium alloy BT6]. Electronic source of Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials. URL: <https://www.viam.ru/public/index.php?year=2010>.
13. **Pogreljuk I. N., Skvorcova S. V., Fedirko V. N. et al.** Antifrikcionnye harakteristiki titanovogo splava VT6 posle termovodorodnoj obrabotki i posledujushhego azotirovanija [Anti-friction characteristics of BT6 titanium alloy after thermohydrogen treatment and following nitridation]. *Fiziko-himichna mehanika materialiv = Physico-chemical mechanics of materials*, 2015, vol. 51, no. 3, pp. 90–99.
14. **Karpov V. N., Mamonov A. M., Spektor V. S. et al.** Materialovedcheskie i tehnologicheskie aspekty proektirovanija vysokonagruzennyh implantatov iz titanovyh splavov [Material Science and technological aspects of design of high-loaded implants made of titanium alloys]. *Titan = Titanium*, 2014, no. 4, pp. 43–51.
15. **Ovchinnikov A. V.** *Obosnovanie i razrabotka vodorodnoj tehnologii proizvodstva deformirovannyh polufabrikatov iz titanovyh splavov. Avtoref. diss. dokt. tehn. nauk* [Rationale and development of hydrogen technology for the production of deformed semi-finished products from titanium alloys]. Moscow, 2011, 46 p.
16. **Kotljarskij F. M., Borisov G. P.** O dvoystvennoj roli vodoroda v processah formirovanija otlivok iz aljuminievyh splavov [On the dual role of hydrogen in processes of forming castings from aluminum alloys]. In book «50 let v Akademii nauk Ukrainy: ILP, IPL, FTIMS», Kiev, *Processy lit'ja = Foundry processes*, 2008, 500 p.
17. **Afanas'ev V. K., Prudnikov A. N.** Vlijanie deformacii v tverdozhidkom sostojanii i navodorazhivaniya shihty na svojstva otlivok iz aljuminievyh splavov [Effect of deformation in the solid-liquid state and hydrogenation of the charge on the properties of aluminum alloy alloys]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry production*, 1988, no. 9, pp. 12–13.
18. **Kotljarskij F. M., Belik V. I., Borisov G. P.** Vlijanie vodoroda na formirovanie i svojstva otlivok iz alminievyh splavov, zalivaemyh pri nizkom peregreve [The influence of hydrogen on the formation and properties of castings from aluminum alloys filled with low superheat]. *Processy lit'ja = Foundry processes*, 2014, no. 3 (105), pp. 10–22.
19. **Afanas'ev V. K., Popova M. V.** Primenenie vodopoda dlja poluchenija neobhodimyh svojstv aljuminievyh splavov [Hydrogen application for obtaining the necessary properties of aluminum alloys]. *Vodorodnaja obrabotka materialov = Hydrogen treatment of materials*. Proceedings of 4th International Conf. «HTM-2004», Doneck, DonNTU, Don IFC IAU, 2004, pp. 243–245.
20. **Gol'cov V. A., Volkov A. F., Smirnov L. I., Grinchenko E. I.** Razrushenie metallicheskih materialov pod vozdejstviem vodoroda [Destruction of metallic materials under the influence of hydrogen]. *Fizika tverdogo tela*. 1986, pp. 57–61.
21. **Gol'cov V. A.** Fundamental'nye osnovy vodorodnoj obrabotki materialov [Fundamentals of Hydrogen Treatment of Materials]. *Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal Al'ternativnaja jenergetika i jekologija = International scientific journal Alternative Energy and Ecology*, 2014, no. 1, pp. 42–69.
22. **Verbeckij V. N., Mitrohin S. V., Tepanov A. A., Movlaev Je. A.** *Izuchenie vlijanija processa HDDR na morfologiju intermetallida Nd₂Fe₁₄B* [The study of the influence of the HDDR process on the morphology of the intermetallic compound]. Moscow, MGU Publ., 2017. 12 p. URL: <http://www.chem.msu.ru/rus/teaching/highp/HDDR.pdf>

23. Kianvash Abbas, Harris I. R. Hydrogen decrepitation as a method of powder preparation of a 2:17-type, Sm(Co, Cu, Fe, Zr)8.92 magnetic alloy. *J. Mater. Sci.*, 1985, Vol. 20, 682 p. <https://doi.org/10.1007/BF01026543>.
24. Sugimoto S., Book D. HDDR Process for the Production of High Performance Rare-Earth Magnets. Handbook of Advanced Magnetic Materials, Springer, US, 2006, pp. 977–1007. DOI: 10.1007/1-4020-7984-2_23.
25. Karakozov B. K., Skakov M. K., Kurbanbekov Sh. R., Sitnikov A. A. Intermetallidy na osnovе sistemy Ti–Al–Nb dlja hranenija vodoroda [Intermetallics based on Ti–Al–Nb system for hydrogen storage]. *Novye materialy i tehnologii: poroshkovaja metallurgija, kompozicionnye pokrytija, svarka: materialy 13-j Mezhdunar. nauch. tehn. konf.* Minsk 16–18 may 2018. 2018, pp. 190–191.
26. Bulyk I. I., Panasjuk V. V. Voden' jak tehnologichne seredovyshe dlja formuvannja nanostruktury u feromagnetnyh Sm–Co splavah [Hydrogen as a technological environment for the formation of nanostructure in ferromagnetic Sm–Co alloys]. *Fiz. him. mehanika materialiv = Physico-chemical mechanics of materials*, 2012, no. 1. pp. 9–18.
27. **Issledovanie** vlijanija vodoroda i kisloroda na processy azotirovanija i cementacii metallov i splavov s cel'ju optimizacii uslovij ih himiko-termicheskoj obrabotki [Investigation of the influence of hydrogen and oxygen on the processes of nitriding and cementation of metals and alloys in order to optimize the conditions for their chemical-thermal treatment]. Doneck, DonNU Publ, 2003, 82 p.
28. **Izuchenie** zavisimosti vodorodno-stimulirovannoj diffuzii ot sostava splavov na zheleznoj osnove pri HTO koncentrirovannymi potokami jenergii [Study of the dependence of hydrogen-stimulated diffusion on the composition of iron-based alloys with HTO by concentrated energy fluxes]. Doneck, 1996, 56 p.
29. **Izuchenie osnovnyh zakonornostej vodorodno-stimulirovannoj diffuzii v metallah i splavah: Razrabotka mehanizma osnovnyh processov vodorodno-stimulirovannoj diffuzii v metallah i splavah. Prakticheskie rekomendacii** [Study of the main regularities of hydrogen-stimulated diffusion in metals and alloys: Development of the mechanism of the basic processes of hydrogen-stimulated diffusion in metals and alloys. Practical recommendations: report on scientific research work (conclusion)]. Doneck, 1997, 145 s.
30. Bar'jahtar V. G., Buravlev Ju. M., Miloslavskij A. G., Kushnir M. P. **Vodorod v diffuzionnyh processah himiko-termicheskoj obrabotki metallov i splavov** [Hydrogen in diffusion processes of chemical-thermal treatment of metals and alloys]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1999, 253 p.
31. Ljasockaja V. S. **Termicheskaia obrabotka svarnyh soedinenij titanovyh splavov** [Thermal treatment of welded joints of titanium alloys]. Moscow, Jekomet Publ., 2003, 352 p.
32. Il'in A. A., Pol'kin I. S., Mamonov A. A. et al. Termovodorodnaja obrabotka svarnyh soedinenij iz titanovyh splavov [Thermal hydrogen treatment of welded joints from titanium alloys]. *Tehnologija legkih splavov=Technology of lightweight*, 2002, no. 3, pp. 5–12.
33. Mal'kov A. V., Nizkin I. D., Shevchenko V. V. Termociklicheskaia obrabotka titanovyh splavov s ispol'zovaniem vodorodnogo naklepa [Thermocyclic treatment of titanium alloys using hydrogen hardening]. *FHMM = Physico-chemical mechanics of materials*, 1991, no. 1, pp. 109–112.
34. Goltsova M. V. Platinum metals key role in hydrogen economy progress and the fundamentals of hydrogen palladium membrane technology / M. V. Goltsova, V. V. Vasekin, G. I. Zhiron. *Proceedings International Hydrogen Energy Congress and Exhibition, IHEC-2007*, Istanbul, Turkey, 13–15 July, CD/IHEC07-0967.pdf, 10 pp.
35. Gol'cov V. A., Gol'cova M. V. Inducirovannyj vodorodom polimorfizm i fazovo-strukturnye osnovy vodorodnoj obrabotki materialov [Hydrogen-induced polymorphism and phase-structural bases of hydrogen treatment of materials]. *Vestnyk Permskogo nacyonal'nogo yssledovatel'skogo polytehnycheskogo unyversyteta. Mashynostroenye, materyalovedenye= Bulletin of Perm national research polytechnical university. Mechanical Engineering, Material Science*, 2016, Vol. 18, no. 3, pp. 7–29.
36. Gol'cov V. A., Gol'cova M. V. **Ynducirovannyj vodorodom polimorfizm metallov y osnovy vodorodnoj obrabotki materyalov (obzor)** [Hydrogen induced polymorphism of metals and the basis of hydrogen treatment of materials (review)]. Sb. mater. 60-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencyi «Aktual'nye problemi prochnosti». Vytebsk, Belarus'. 14–18 maja 2018, pp. 28–30.
37. Gol'cova M. V., Gol'cov V. A. Polimorfizm metallov, inducirovannyj vodorodom, kak osnova vodorodnoj obrabotki materialov [The polymorphism of metals induced by hydrogen as the basis of hydrogen treatment of materials]. *Sb. dokladov Mezhdunarodnogo simpoziuma «Tehnologii. Oborudovanie. Kachestvo»*. Minsk, BNTU, 29 maja – 1 ijunja 2018, pp. 162–163.
38. Gol'cova M. V., Zhiron G. I. Osnovy vodorodnoj obrabotki materialov (obzor) [Basics of hydrogen treatment of materials]. In: *Aktual'nye problemy prochnosti: monografija = Actual problems of strength*. In 2 chapters. Chapter 2. Vitebsk: UO «VGTU» Publ., 2018, 512 pp, Glava 16, pp. 329–352.
39. Big Soviet Encyclopedia. Electronic source. URL: <http://bse.sci-lib.com/article110425.html>.
40. Bukin V. I., Igumnov M. S., Safonov V. V., Safonov VI. V. **Pererabotka proizvodstvennyh othodov i vtorichnyh syr'evyh resursov, sodержashchih redkie, blagorodnye i cvetnye metally** [Processing of industrial waste and secondary raw materials containing rare, noble and non-ferrous metals]. Moscow, Izdatel'skij dom Delovaja stolica Publ., 2002, 224 p.
41. **Vzaimodejstvie izotopov vodoroda s konstrukcionnymi materialami** [Interaction of hydrogen isotopes with structural materials]. IHISM'15 JUNIOR: Proceedings 10 International Conference of young specialists and scientists named by. A. A. Kurdjumov, 2016, 300 pp. URL: <http://book.sarov.ru/product/ihism-15/#s3>.
42. **Special Issue on The 21st World Hydrogen Energy Conference (WHEC 2016)**, 13–16 June 2016, Zaragoza, Spain / Edited by Edited by Luis Carlos Correias, Ángel Larrea, María Jesús Lázaro, José Ángel Peña. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42, Issue 19, pp. 13309–14044.
43. **Special Issue on The 15th International Symposium on Metal–Hydrogen Systems (MH2016)**. 7–12 August 2016, Interlaken, Switzerland. Edited by Shin-ichi Orimo. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42, Issue 35, pp. 22303–22640.
44. **HYdrogen POWER THEoretical and Engineering Solutions – International Symposium (Hypothesis XII)** / Edited by Angelo Basile, Gaetano Squadrito, Giuseppe Spazzafumo. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, vol. 43, Issue 26, pp. 11653–11902.