

Научная статья

УДК 620.1

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29407>



*И.С. Соколов¹ ✉, М.Р. Дасаев¹, А.В. Рыженков¹,
С.В. Григорьев¹, И.А. Романов², М.Р. Атауллин¹*

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский энергетический институт (технический университет)», Москва, Россия;

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

✉ sokolviv@inbox.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ PVD-ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ Cr С ЦЕЛЬЮ ЗАЩИТЫ ОТ ВОДОРОДНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ СТАЛЕЙ

Аннотация. В настоящее время ведется активное развитие и совершенствование технологий использования водорода в качестве энергоресурса. Однако, активное внедрение подобных технологий сталкивается как с технологическими, так и с экономическими трудностями. Охрупчивание и последующее разрушение конструкционных материалов, происходящее при взаимодействии с водородсодержащими средами, приводит к необходимости использования дорогостоящих материалов и повышению требований к надежности, следствием которого является снижение экономической эффективности проектов. В данной работе проведены исследования эффективности PVD-покрытия на основе хрома (Cr) для защиты от водородного охрупчивания углеродистой стали Ст20. В результате проведения экспериментальных исследований путем испытания образцов на растяжение, выявлено уменьшение степени охрупчивания экспериментальных образцов с PVD-покрытием толщиной 2 мкм в 3 раза по сравнению с образцами-свидетелями. Вместе с тем получены снимки структуры экспериментальных образцов с использованием электронного сканирующего микроскопа.

Ключевые слова: водородное охрупчивание, стали, PVD-технология, барьерные покрытия, механические испытания.

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта «Разработка технологических основ защиты от водородного охрупчивания сталей» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2022–2024 гг.

Для цитирования:

Соколов И.С., Дасаев М.Р., Рыженков А.В. и др. Исследование применения PVD-покрытия на основе Cr с целью защиты от водородного охрупчивания сталей // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 4. С. 107–119. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29407>



I.S. Sokolov¹ ✉, M.R. Dasaev¹, A.V. Ryzhenkov¹,
S.V. Grigoryev¹, I.A. Romanov², M.R. Ataullin¹

Moscow Power Engineering Institute (Technical University),
Moscow, Russia;

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

✉ sokolviv@inbox.ru

RESEARCH OF APPLICATION OF CR-BASED PVD COATING FOR PROTECTION AGAINST HYDROGEN EMBRITTELEMENT OF STEELS

Abstract. Currently, there is an active development and improvement of technologies for the use of hydrogen as an energy resource. However, active implementation of such technologies faces both technological and economic difficulties. Embrittlement and subsequent destruction of structural materials, which occurs in interaction with hydrogen-containing media, leads to the need for expensive materials and increased reliability requirements, the consequence of which is a decrease in the economic efficiency of projects. In this paper, the effectiveness of chromium (Cr) based PVD coating for protection against hydrogen embrittlement of St20 carbon steel was investigated. The samples underwent experimental tensile testing. The results revealed a 3-fold decrease in embrittlement of experimental samples with 2 μm thick PVD-coating compared to witness samples. In addition, images of the structure of the experimental samples were obtained using an electron scanning microscope.

Keywords: hydrogen embrittlement, steels, PVD technology, barrier coatings, mechanical testing.

Acknowledgements: Scientific research program «Priority 2030: Future Technologies» for the period 2022–2024. No. 2022/24-17

Citation:

I.S. Sokolov, M.R. Dasaev, A.V. Ryzhenkov and etc., Research of application of Cr-based PVD coating for protection against hydrogen embrittlement of steels, *Global Energy*, 29 (04) (2023) 107–119, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29407>

Введение. Водород широко используется в различных сферах промышленности, в том числе нефтеперерабатывающей для очистки нефтепродуктов от примесей, в химической для производства аммиака, метанола и горячебрикетированного железа, кроме того в последнее время растет доля применения водорода в качестве энергоносителя [1–3]. По данным, предоставленным Международным энергетическим агентством [4], в 2021 году общемировое потребление водорода составило 94 Мт, причем наблюдается тенденция роста потребления.

Значительный рост (до 60%) отмечается в потреблении водорода для использования в качестве топлива для транспорта. К 2030 году, в соответствии с заявленными к реализации проектами, прогнозируется увеличение ежегодного потребления водорода до 130 Мт, из которых ~10% будут использоваться в энергетике и транспортной отрасли [4].

Для Российской Федерации необходимость развития водородной энергетики также отражена в Концепции развития на период до 2050 года¹. При этом нефтеперерабатывающая и химическая промышленности, в том числе производство аммиака, являются важнейшими элементами эко-

¹ Распоряжение от 5 августа 2021 года №2162-р "Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации".

номики Российской Федерации, что определяет высокую важность исследований, связанных с повышением надежности и эффективности установок и систем, используемых для генерации, транспортировки и хранения водорода.

Водородное охрупчивание сталей, происходящее при взаимодействии со средами, характеризующимися высоким содержанием водорода – это одна из наиболее актуальных проблем, замедляющих развитие технологий использования водорода. Деградация свойств конструкционных материалов приводит к авариям и снижению надежности элементов систем, взаимодействующих с водородом [5, 6]. Причем кроме ухудшения прочностных свойств, водородное охрупчивание также приводит к изменению механизма разрушения материала [7]. Так, для пластичных материалов, для которых в обычном случае характерно разрушение с возникновением и схлопыванием пустот в объеме материала, при водородном охрупчивании механизм разрушения изменяется на трансгранулярное «квази-расщепление», либо интергранулярное расщепление [8].

Стоит отметить, что водородное охрупчивание может быть, как обратимым, так и необратимым. При обратимом водородном охрупчивании атомы водорода диффундируют через кристаллическую решетку и аккумулируются в областях потенциальных трещин, интенсифицируя процесс отложенного разрушения [9]. В то же время при необратимом водородном охрупчивании атомы водорода формируют молекулы, аккумулирующиеся в областях дефектов и создающие дополнительное давление, которое вызывает разрушение материала. Кроме того, материал подвергнувшийся обратимому водородному охрупчиванию может быть восстановлен к изначальному состоянию с помощью методов удаления водорода [10].

Для защиты от водородного охрупчивания применяется широкий спектр методов, которые можно разделить на три основные группы: выбор материала, стойкого к водородному охрупчиванию; обработка металла; использование барьерных покрытий [11].

При этом стоит отметить, что подбор устойчивых к водородному охрупчиванию материалов ограничивается необходимостью обеспечения требуемых свойств, таких как: прочностные характеристики, свариваемость, рабочий температурный диапазон [12, 13]. В рамках данного метода интерес также вызывают композитные и полимерные материалы, однако их использование ограничивается экономической целесообразностью и сложностью техпроцесса производства материалов с необходимыми свойствами [14].

Обработка металла, обеспечивающая изменение свойств поверхности и структуры материала, также позволяет повысить устойчивость к водородному охрупчиванию [15, 16]. К таким методам относят: отжиг, получение мелкозернистой структуры [17, 18], обработка поверхности лазером [19–21]. Однако, данные методы не всегда возможны для деталей сложной конфигурации и обеспечивают меньший эффект, по сравнению с использованием барьерных покрытий [22].

Среди барьерных покрытий, в свою очередь, можно выделить: полимерные, керамические и металлические покрытия. Для полимерных покрытий основным методом нанесения является газотермическое напыление и, несмотря на сравнительно низкую механическую прочность данных покрытий, они отличаются низкими коэффициентами проницаемости водородом [23–25]. Отдельно можно также выделить покрытия на основе графена, имеющие низкие коэффициенты проницаемости при условии сплошного покрытия без дефектов [26–28].

Керамические покрытия характеризуются более высокой, по сравнению с полимерными, механической прочностью, устойчивостью к высоким температурам, а также изоляционными свойствами [29]. Многие нитриды, карбиды и оксиды также обеспечивают коррозионную стойкость, что является полезной характеристикой при работе в водородсодержащих средах [30]. Барьерный механизм керамических покрытий объясняется формированием в объеме покрытия ковалентных связей между атомами водорода и углерода/азота/кислорода, входящих в состав покрытия [31, 32].

Высокую эффективность с точки зрения снижения проницаемости водородом, а также экономической целесообразности применения, демонстрируют покрытия из различных металлов

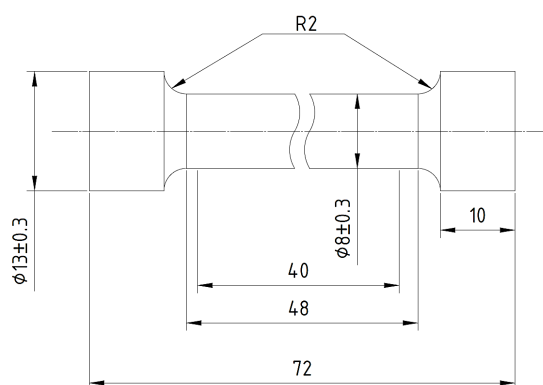


Рис. 1. Эскиз исполнения экспериментального образца
 Fig. 1. Sketch of the experimental sample design

[33]. Существует широкий спектр металлов, используемых в качестве барьерного покрытия для защиты от водородного охрупчивания, и методов их нанесения, в том числе: гальванизация, цинкование, осаждение из газовой фазы и другие [34]. Стоит отметить, что, в случае металлических покрытий, проницаемость водородом сильно зависит от типа кристалла (монокристалл, поликристалл, аморфный кристалл), микроструктуры и наличия легирующих компонентов. При нанесении металлического покрытия важно также учитывать тип взаимодействия между поверхностью и подложкой (будет ли сформирован интерметаллический слой) [35]. Металлические покрытия также характеризуются высокой прочностью и коррозионной стойкостью.

В данной работе будет рассмотрена эффективность использования покрытия на основе Cr, нанесенного на поверхность образцов из стали Ст20, методом магнетронного напыления в вакууме (PVD).

Материалы и методы

Используемая для изготовления образцов сталь Ст20 относится к конструкционным сталям высокого уровня качества: не склонна к отпускной хрупкости; сваривается без ограничений, кроме деталей после химико-термической обработки; в структуре присутствует феррит и перлит.

Оценка влияния водородного охрупчивания на свойства материала проводилась путем испытаний на растяжение в соответствии с ГОСТ Р 9.915-2010 «Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, покрытия, изделия. Методы испытаний на водородное охрупчивание». Экспериментальные образцы изготавливались в соответствии с ГОСТ 1497, эскиз исполнения экспериментального образца с характерными размерами представлен на рис. 1. Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены 4 экспериментальных образца.

Насыщение образцов водородом производилось с помощью установки УС-150 (ОИВТ РАН), предназначенной для изучения водородсорбционных свойств различных материалов при температурах от 243 до 673 К и давлении водорода до 15 МПа. Основные составные части и интерфейс программы управления установки представлен на рис. 2.

Исследуемые образцы помещались в рабочий сосуд установки 10.1. Далее сосуд помещался в нагреватель 10.2. и закреплялся в изолирующем кожухе 10.3. На следующем этапе из рабочего сосуда в течении часа откачивался воздух с помощью турбомолекулярного вакуумного насоса до остаточного давления менее 10 Па. Ваккумированный рабочий сосуд нагревался до температуры 423 К с помощью нагревателя 10.2. Контроль температуры осуществлялся с помощью термпары ТП6 типа хромель-алюмель. Далее из аккумулятора водорода 7 в рабочий сосуд подавался водород высокой чистоты при давлении выше 9 МПа. Давление в аккумуляторе достигается за счет нагрева металлгидридной засыпки на базе соединения LaNi_5 , заполненной водородом. По-

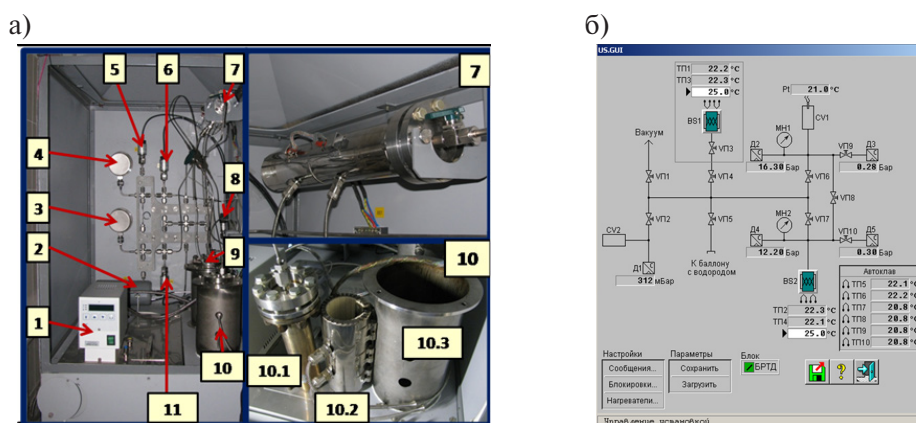


Рис. 2. Основные составные части (а) и интерфейс программы управления (б) установки УС-150:

1 – термостат (-30 – 150 °С; 2 – вакуумная емкость (CV2); 3,4 – манометры (МН1, МН2); 5 – датчик давления (Д3, 1–10 бар); 6 – датчик давления (Д2, 1–150 бар); 7 – аккумулятор водорода с LaNi5 (BS1); 8 – датчик давления (Д1, 0–1000 мбар); 9 – буферная емкость (CV1); 10 – рабочий автоклав (BS2); 10.1 – автоклав; 10.2 – нагреватель (до 400 °С); 10.3 – термоизолирующий кожух; 11 – датчик давления (Д4, 1-150 бар)

Fig. 2. Main components (a) and control program interface (b) of the US-150 installation:

1 – thermostat (-30 – 150 °C; 2 – vacuum vessel (CV2); 3,4 – pressure gauges (МН1, МН2); 5 – pressure sensor (Д3, 1–10 bar); 6 – pressure sensor (Д2, 1–150 bar); 7 – hydrogen accumulator with LaNi5 (BS1); 8 – pressure sensor (Д1, 0–1000 mbar); 9 – buffer vessel (CV1); 10 – working autoclave (BS2); 10.1 – autoclave; 10.2 – heater (up to 400 °C); 10.3 – thermo-insulating cover; 11 – pressure sensor (Д4, 1-150 bar)

сле достижения, согласно показаниям контрольно-измерительной системы, требуемых величин давления и температуры, образцы выдерживались в заданных условиях в течение 8 часов. На последнем этапе водород удалялся из рабочего сосуда, образцы остужались и после тщательного вакуумирования извлекались на воздух.

Процесс формирования покрытия на образцах осуществлялся в вакуумной установке «Гефест+» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»). Эта установка сочетает в себе технологии магнетронного и плазменно-дугового напыления.

Подготовка поверхностей экспериментальных образцов к обработке проводилась в установке электролитно-плазменной полировки ЭПП-100 на специально изготовленной оснастке для гантелеобразных экспериментальных образцов. После проведения всех мероприятий экспериментальные образцы были установлены в вакуумную камеру. Было сформировано покрытие на основе Cr, толщиной 2 мкм. Толщина покрытия измерялась с использованием толщиномера покрытий PosiTector 6000 F90S1.

Испытания экспериментальных образцов на растяжение производились с использованием разрывной машины ИР 5047-50, при скорости растяжения 5 мм/мин.

Исследование структуры экспериментальных образцов производилось с использованием растрового электронного микроскопа Tescan Mira LMU. Для проведения исследований на микроскопе были изготовлены шлифы из рабочей области экспериментального образца.

Экспериментальные образцы были разделены на 4 партии со следующей маркировкой: ибп – исходный образец без покрытия; нбп – наводороженный образец без покрытия; ип – исходный образец с покрытием; нп – наводороженный образец с покрытием.

Результаты и обсуждение

Диаграммы деформации экспериментальных образцов, полученные по результатам испытаний на растяжение представлены на рис. 3.

Численные значения деформации образцов, полученные в результате испытаний на растяжение приведены в табл. 1.

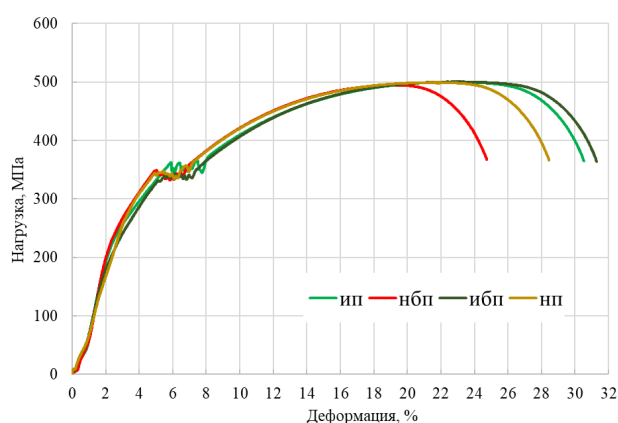


Рис. 3. Диаграммы деформации экспериментальных образцов

Fig. 3. Deformation diagrams of experimental samples

Таблица 1

Деформация экспериментальных образцов по результатам испытаний на растяжение

Table 1

Deformation of experimental samples based on the results of tensile tests

Образец	ибп	нбп	ип	нп
Деформация, %	31,29	26,28	30,52	28,45

В соответствии с полученными результатами, наименьшее значение деформации образца перед разрушением, характеризующее наибольшую хрупкость, отмечено у экспериментального образца без покрытия, подвергнутого наводороживанию. Значение деформации для него составило 26,28 %, что на 5,01 % меньше величины, полученной для исходного образца не подвергнутого наводороживанию.

При этом для наводороженного образца с покрытием на основе Сг снижение деформации составило 2,84 %, то есть изменение деформации снизилось в 1,76 раз по сравнению с образцом без покрытия. Стоит отметить, что для образца с покрытием, не подвергнутого наводороживанию, также зафиксировано снижение величины деформации до момента разрушения на 0,77 %, которое может быть связано с термической обработкой поверхности образцов в процессе нанесения покрытия.

В случае же сравнения исходного и наводороженного образцов с покрытием снижение деформации составляет лишь 2,07 %, что позволяет сделать вывод о заметном снижении влияния водородного охрупчивания на свойства материала.

Результаты определения предела прочности экспериментальных образцов представлены на рис. 4.

Минимальный предел прочности был получен для наводороженного образца без покрытия нбп и составил 494,6 МПа, что на 1,13 % ниже значения 500,25 МПа, полученного для исходного образца без покрытия.

Для наводороженного образца с барьерным покрытием на основе Сг значение предела прочности составило 499,07 Мпа, что менее чем на 0,25 % ниже, чем у исходного образца, так что можно сделать вывод об отсутствии значимых изменений в прочностных характеристиках для данных экспериментальных образцов.

На рис. 5 представлены изображения области разрыва, полученные на электронном сканирующем микроскопе.

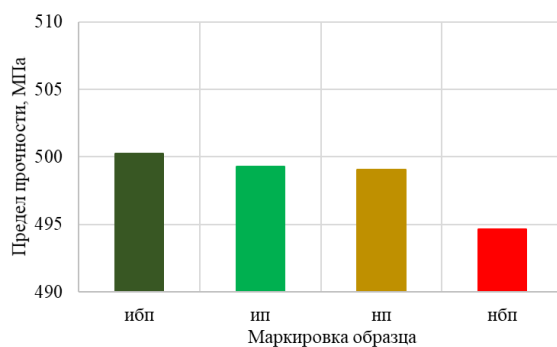


Рис. 4. Предел прочности экспериментальных образцов

Fig. 4. Tensile strength of experimental samples

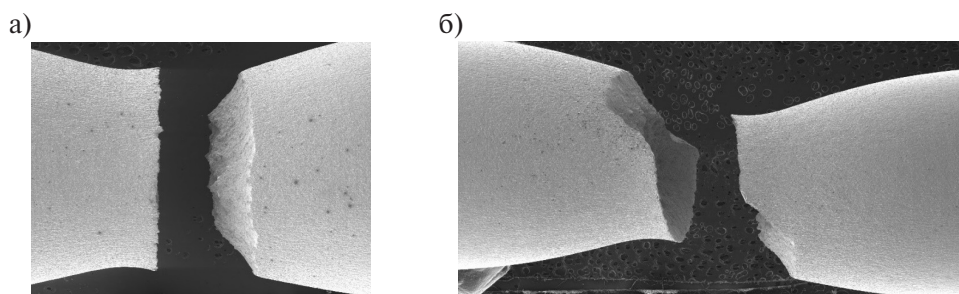


Рис. 5. Фотоснимок области разрыва для исходного (а) и наводороженного (б) образцов без покрытия

Fig. 5. Photo image of the fracture region for original (a) and hydrogenated (b) uncoated samples

Область разрыва для исходного образца, как видно из рис. 5 (а), имеет кольцеобразную форму, разрушение при разрыве произошло равномерно по окружной поверхности образца. Для наводороженного образца (см. рис. 5 (б)) наблюдается сколообразная область разрыва, вызванная изменением приповерхностной структуры материала в результате наводороживания.

Изображения структуры материала в области разрыва для исходного (ибп, а) и наводороженного (ибп, б) образцов приведены на рис. 6.

На изображениях выделены области, характеризующиеся структурой, соответствующей хрупкому разрушению. При этом, на изображении наводороженного образца, рисунок 5 (б), площадь данных областей заметно выше, чем у исходного. Стоит отметить, что данные изменения в структуре более характерны для приповерхностной области разрушения, так как проведенный в данной работе процесс наводороживания не предусматривает охрупчивания всего объема экспериментальных образцов.

Заключение

Проведенные в рамках данной работы исследования эффективности PVD-покрытия на основе Cr, нанесенного методом магнетронного напыления в вакууме, позволяют сделать вывод о его эффективности в области защиты от водородного охрупчивания стали Ст20.

По результатам проведенных на разрывной машине испытаний на растяжение экспериментальных образцов полученное снижение деформации наводороженного образца перед разрушением составило 5,01 % по сравнению с исходным образцом, не подвергавшегося наводороживанию. При этом для наводороженного образца с покрытием на основе Cr снижение деформации составило 2,84 %, то есть отмечено снижение изменения деформации в 1,76 раз.

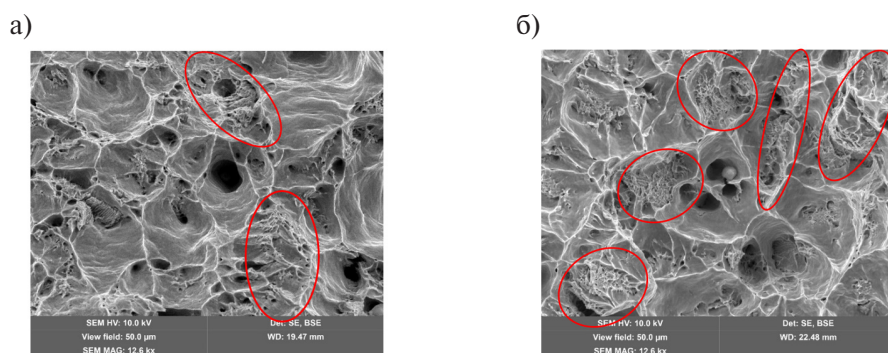


Рис. 6. Внешний вид структуры материала в области разрыва для исходного (а) и наводороженного (б) образцов без покрытия

Fig. 6. External view of material structure in the fracture region for original (a) and hydrogenated (b) uncoated samples

Стоит отметить, что при сравнении исходного и наводороженного экспериментальных образцов с покрытием на основе Cr снижение значения деформации перед разрушением у последнего составило не более 2,07 %.

Полученные в рамках испытаний на растяжение значения предела прочности экспериментальных образцов из стали Ст20 согласуются с результатами измерения деформации. Наименьшие значения предела прочности отмечены у наводороженного экспериментального образца без барьерного покрытия, в то время как для наводороженного экспериментального образца с покрытием на основе Cr значимых изменений в значениях предела прочности по сравнению с контрольным образцом не обнаружено.

Таким образом, можно сделать вывод о возможности использования более дешевых углеродистых сталей в водородсодержащих средах за счет нанесения на поверхность барьерных покрытий на основе Cr.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Komarov I., Rogalev N., Rogalev A., Kindra V., Lisin E., Osipov S. Technological Solutions in the Field of Production and Use of Hydrogen Fuel to Increase the Thermal Efficiency of Steam Turbine TPPs. *Inventions*, 2022, 7(3), 63.
- [2] Kopteva A., Kalimullin L., Tsvetkov P., Soares A. Prospects and Obstacles for Green Hydrogen Production in Russia. *Energies*, 2021, 14 (3), 718. DOI: 10.3390/en14030718
- [3] Kindra V., Maksimov I., Oparin M., Zlyvko O., Rogalev A. Hydrogen Technologies: A Critical Review and Feasibility Study. *Energies*, 2023, 16 (14), 5482.
- [4] IEA (2022), *Global Hydrogen Review 2022*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>, License: CC BY 4.0.
- [5] Wang D., Hagen A.B., Fathi P.U., Lin M., Johnsen R., Lu X. Investigation of hydrogen embrittlement behavior in X65 pipeline steel under different hydrogen charging conditions // *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 860, 2022. P. 144262.
- [6] Jack T.A., Pourazizi R., Ohaeri E., Szpunar J., Zhang J., Qu J. Investigation of the hydrogen induced cracking behaviour of API 5L X65 pipeline steel // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, 2020. pp. 17671–17684.
- [7] Chen Y.S., Lu H., Liang J., Rosenthal A., Liu H., Sneddon G., McCarroll I., Zhao Z., Li W., Guo A., Cairney J.M. Observation of hydrogen trapping at dislocations, grain boundaries, and precipitates // *Science*, Vol. 367, 2020. pp. 171–175.

- [8] **Wasim M., Djukic M.B., Ngo T.D.** Influence of hydrogen-enhanced plasticity and decohesion mechanisms of hydrogen embrittlement on the fracture resistance of steel // *Engineering Failure Analysis*, Vol. 123, 2021. P. 105312.
- [9] **Li X., Ma X., Zhang J., Akiyama E., Wang Y., Song X.** Review of Hydrogen Embrittlement in Metals: Hydrogen Diffusion, Hydrogen Characterization, Hydrogen Embrittlement Mechanism and Prevention // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, Vol. 33, 2020. pp. 759–773.
- [10] **Liang S., Huang M., Zhao L., Zhu Y., Li Z.** Effect of multiple hydrogen embrittlement mechanisms on crack propagation behavior of FCC metals: Competition vs. synergy // *International Journal of Plasticity*, Vol. 143, 2021. P. 103023.
- [11] **Laadel N.E., Mansori M.E., Kang N., Marlin S., Boussant-Roux Y.** Permeation barriers for hydrogen embrittlement prevention in metals – A review on mechanisms, materials suitability and efficiency // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, 2022. pp. 32707–32731.
- [12] **Liu J., Zhao M., Rong L.** Overview of hydrogen-resistant alloys for high-pressure hydrogen environment: on the hydrogen energy structural materials // *Clean Energy*, Vol. 7, March 2023. pp. 99–115.
- [13] **Rudomilova D., Prošek T., Salvetr P., Knaislová A., Novák P., Kodým R., Schimo-Aichhorn G., Muhr A., Duchaczek H., Luckeneder G.** The effect of microstructure on hydrogen permeability of high strength steels // *Materials and Corrosion*, Vol. 71, 2020. pp. 909–917.
- [14] **Barthelemy H., Weber M., Barbier F.** Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, 2017. pp. 7254–7262.
- [15] **Song Y., Huang S., Sheng J., Agyenim-Boateng E., Jiang Y., Liu Q., Zhu M.** Improvement of hydrogen embrittlement resistance of 2205 duplex stainless steel by laser peening // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, 2023. pp. 18930–18945.
- [16] **Wang Y., Hu S., Li Y., Cheng G.** Improved hydrogen embrittlement resistance after quenching–tempering treatment for a Cr–Mo–V high strength steel // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, 2019. pp. 29017–29026.
- [17] **Kim D.H., Moallemi M., Kim K.S., Cho H.J., Kim S.J.** Correlation between grain size variation and hydrogen embrittlement in a cost-effective Fe₄₀Mn₄₀Ni₁₀Cr₁₀ austenitic medium entropy alloy // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, 2023. pp. 5708–5717.
- [18] **Yang D.C., Song S.Y., Kim H.J., Lee S.I., Dutta B., Kim Y.K., Shim J.H., Suh J.Y., Na Y.S., Sohn S.S.** Roles of the grain-boundary characteristics and distributions on hydrogen embrittlement in face-centered cubic medium-entropy V_xCr_{1-x}CoNi alloys // *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 873, 2023. P. 145028.
- [19] **Sun B., Dong X., Wen J., Zhang X.C., Tu S.T.** Microstructure design strategies to mitigate hydrogen embrittlement in metallic materials // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, June 2023.
- [20] **Jiang Y.F., Xu W., Zhang Q., Zhang B.** Improvement of hydrogen embrittlement resistance by intense pulsed ion beams for a martensitic steel // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, 2021. pp. 21239–21248.
- [21] **Wang Y., Xie H., Zhou Z., Li X., Wu W., Gong J.** Effect of shot peening coverage on hydrogen embrittlement of a ferrite-pearlite steel // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, 2020. pp. 7169–7184.
- [22] **Wetegrove M., Duarte M.J., Taube K., Rohloff M., Gopalan H., Scheu C., Dehm G., Kruth A.** Preventing Hydrogen Embrittlement: The Role of Barrier Coatings for the Hydrogen Economy // *Hydrogen*, Vol. 4, 2023. pp. 307–322.
- [23] **Lei Y., Hosseini E., Liu L., Scholes C.A., Kentish S.E.** Internal polymeric coating materials for preventing pipeline hydrogen embrittlement and a theoretical model of hydrogen diffusion through coated steel // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, 2022. pp. 31409–31419.
- [24] **Yuan S., Sun Y., Yang C., Zhang Y., Cong C., Yuan Y., Lin D., Pei L., Zhu Y., Wang H.** A novel dual-functional epoxy-based composite coating with exceptional anti-corrosion and enhanced hydrogen gas barrier properties // *Chemical Engineering Journal*, Vol. 449, 2022. P. 137876.

- [25] Seo O.B., Saha S., Kim N.H., Lee J.H. Preparation of functionalized MXene-stitched-graphene oxide/poly (ethylene-co-acrylic acid) nanocomposite with enhanced hydrogen gas barrier properties // Journal of Membrane Science, Vol. 640, 2021. P. 119839.
- [26] Shi K., Xiao S., Ruan Q., Wu H., Chen G., Zhou C., Jiang S., Xi K., He M., Chu P.K. Hydrogen permeation behavior and mechanism of multi-layered graphene coatings and mitigation of hydrogen embrittlement of pipe steel // Applied Surface Science, Vol. 573, 2022. P. 151529.
- [27] Yuan S., Li K., Sun Y., Cong C., Liu Y., Lin D., Pei L., Zhu Y., Wang H. Designing functionalized graphene-stitched-SiC/fluoropolymer novel composite coating with excellent corrosion resistance and hydrogen diffusion barrier properties // Chemical Engineering Journal, Vol. 472, 2023. P. 144881.
- [28] Young K.T., Smith C., Krentz T.M., Hitchcock D.A., Vogel E.M. Graphene synthesized by chemical vapor deposition as a hydrogen isotope permeation barrier // Carbon, Vol. 176, 2021. pp. 106–117.
- [29] Bull S.K., Champ T., Raj S., Weimer A.W., Musgrave C.B. Ab initio screening of refractory nitrides and carbides for high temperature hydrogen permeation barriers // Journal of Nuclear Materials, Vol. 563, 2022. P. 153611.
- [30] Tamura M., Takizawa H. TiAlN/TiMoN Coatings as Hydrogen Barriers // Journal of Materials Science and Engineering A, Vol. 9, February 2019.
- [31] Fite S., Zukerman I., Shabat A.B., Barzilai S. Hydrogen protection using CrN coatings: Experimental and theoretical study // Surfaces and Interfaces, Vol. 37, 2023. P. 102629.
- [32] Liu L., Ruan Q., Xiao S., Meng X., Huang C., Wu Y., Fu R.K.Y., Chu P.K. Fabrication and hydrogen permeation resistance of dense CrN coatings // Surface and Coatings Technology, Vol. 437, 2022. P. 128326.
- [33] C. de Souza Brandolt, Noronha L.C., Hidalgo G.E.N., Takimi A.S., Schroeder R.M., C. de Fraga Malfatti. Niobium coating applied by HVOF as protection against hydrogen embrittlement of API 5CT P110 steel // Surface and Coatings Technology, Vol. 322, 2017. pp. 10–18.
- [34] Lakdhar I., Alhussein A., Capelle J., Creus J. Al-Ti-W alloys deposited by magnetron sputtering: Effective barrier to prevent steel hydrogen embrittlement // Applied Surface Science, Vol. 567, 2021. P. 150786.
- [35] Duminica F.D., Eynde X.V., Mandy M., Nabi B., Georges C., Sturel T., Drillet P., Grigorieva R. Investigation of PVD thin films as hydrogen barriers in aluminized press hardened steels (PHS) // Surface and Coatings Technology, Vol. 397, 2020. P. 125940.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СОКОЛОВ Иван Сергеевич – младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский энергетический институт (технический университет)», без степени.

E-mail: sokolviv@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1829-656X>

ДАСАЕВ Марат Равилевич – ведущий инженер, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский энергетический институт (технический университет)», канд. техн. наук.

E-mail: DasayevMR@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9477-8264>

РЫЖЕНКОВ Артем Вячеславович – главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский энергетический институт (технический университет)», д-р техн. наук.

E-mail: RyzhenkovAV@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2075-1405>

ГРИГОРЬЕВ Сергей Владимирович – ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский энергетический институт (технический университет)», канд. техн. наук.

E-mail: GrigoryevSVI@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2075-1405>

РОМАНОВ Иван Александрович – научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур РАН, без степени.

E-mail: romanoff_i_a@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9413-8008>

АТАУЛЛИН Марат Ринатович – техник 1 категории, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский энергетический институт (технический университет)», без степени.

E-mail: AtaulinMR@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2753-6249>

REFERENCES

- [1] I. Komarov, N. Rogalev, A. Rogalev, V. Kindra, E. Lisin, S. Osipov, Technological Solutions in the Field of Production and Use of Hydrogen Fuel to Increase the Thermal Efficiency of Steam Turbine TPPs. *Inventions*, 2022, 7 (3), 63.
- [2] A. Kopteva, L. Kalimullin, P. Tsvetkov, A. Soares, Prospects and Obstacles for Green Hydrogen Production in Russia. *Energies*, 2021, 14 (3), 718. DOI: 10.3390/en14030718
- [3] V. Kindra, I. Maksimov, M. Oparin, O. Zlyvko, A. Rogalev, Hydrogen Technologies: A Critical Review and Feasibility Study. *Energies*, 2023, 16(14), 5482.
- [4] IEA (2022), Global Hydrogen Review 2022, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>, License: CC BY 4.0.
- [5] D. Wang, A.B. Hagen, P.U. Fathi, M. Lin, R. Johnsen, X. Lu, Investigation of hydrogen embrittlement behavior in X65 pipeline steel under different hydrogen charging conditions // *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 860, 2022. P. 144262.
- [6] T.A. Jack, R. Pourazizi, E. Ohaeri, J. Szpunar, J. Zhang, J. Qu, Investigation of the hydrogen induced cracking behaviour of API 5L X65 pipeline steel // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, 2020. pp. 17671–17684.
- [7] Y.S. Chen, H. Lu, J. Liang, A. Rosenthal, H. Liu, G. Sneddon, I. McCarroll, Z. Zhao, W. Li, A. Guo, J.M. Cairney, Observation of hydrogen trapping at dislocations, grain boundaries, and precipitates // *Science*, Vol. 367, 2020. pp. 171–175.
- [8] M. Wasim, M.B. Djukic, T.D. Ngo, Influence of hydrogen-enhanced plasticity and decohesion mechanisms of hydrogen embrittlement on the fracture resistance of steel // *Engineering Failure Analysis*, Vol. 123, 2021. P. 105312.
- [9] X. Li, X. Ma, J. Zhang, E. Akiyama, Y. Wang, X. Song, Review of Hydrogen Embrittlement in Metals: Hydrogen Diffusion, Hydrogen Characterization, Hydrogen Embrittlement Mechanism and Prevention // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, Vol. 33, 2020. pp. 759–773.
- [10] S. Liang, M. Huang, L. Zhao, Y. Zhu, Z. Li, Effect of multiple hydrogen embrittlement mechanisms on crack propagation behavior of FCC metals: Competition vs. synergy // *International Journal of Plasticity*, Vol. 143, 2021. P. 103023.
- [11] N.E. Laadel, M.E. Mansori, N. Kang, S. Marlin, Y. Boussant-Roux, Permeation barriers for hydrogen embrittlement prevention in metals – A review on mechanisms, materials suitability and efficiency // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, 2022. pp. 32707–32731.

- [12] **J. Liu, M. Zhao, L. Rong**, Overview of hydrogen-resistant alloys for high-pressure hydrogen environment: on the hydrogen energy structural materials // *Clean Energy*, Vol. 7, March 2023. pp. 99–115.
- [13] **D. Rudomilova, T. Prošek, P. Salvetr, A. Knaislová, P. Novák, R. Kodým, G. Schimo-Aichhorn, A. Muhr, H. Duchaczek, G. Luckeneder**, The effect of microstructure on hydrogen permeability of high strength steels // *Materials and Corrosion*, Vol. 71, 2020. pp. 909–917.
- [14] **H. Barthelemy, M. Weber, F. Barbier**, Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, 2017. pp. 7254–7262.
- [15] **Y. Song, S. Huang, J. Sheng, E. Agyenim-Boateng, Y. Jiang, Q. Liu, M. Zhu**, Improvement of hydrogen embrittlement resistance of 2205 duplex stainless steel by laser peening // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, 2023. pp. 18930–18945.
- [16] **Y. Wang, S. Hu, Y. Li, G. Cheng**, Improved hydrogen embrittlement resistance after quenching–tempering treatment for a Cr-Mo-V high strength steel // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, 2019. pp. 29017–29026.
- [17] **D.H. Kim, M. Moallemi, K.S. Kim, H.J. Cho, S.J. Kim**, Correlation between grain size variation and hydrogen embrittlement in a cost-effective Fe₄₀Mn₄₀Ni₁₀Cr₁₀ austenitic medium entropy alloy // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, 2023. pp. 5708–5717.
- [18] **D.C. Yang, S.Y. Song, H.J. Kim, S.I. Lee, B. Dutta, Y.K. Kim, J.H. Shim, J.Y. Suh, Y.S. Na, S.S. Sohn**, Roles of the grain-boundary characteristics and distributions on hydrogen embrittlement in face-centered cubic medium-entropy V_xCr_{1-x}CoNi alloys // *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 873, 2023. P. 145028.
- [19] **B. Sun, X. Dong, J. Wen, X.C. Zhang, S.T. Tu**, Microstructure design strategies to mitigate hydrogen embrittlement in metallic materials // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, June 2023.
- [20] **Y.F. Jiang, W. Xu, Q. Zhang, B. Zhang**, Improvement of hydrogen embrittlement resistance by intense pulsed ion beams for a martensitic steel // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 46, 2021. pp. 21239–21248.
- [21] **Y. Wang, H. Xie, Z. Zhou, X. Li, W. Wu, J. Gong**, Effect of shot peening coverage on hydrogen embrittlement of a ferrite-pearlite steel // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, 2020. pp. 7169–7184.
- [22] **M. Wetegrove, M.J. Duarte, K. Taube, M. Rohloff, H. Gopalan, C. Scheu, G. Dehm, A. Kruth**, Preventing Hydrogen Embrittlement: The Role of Barrier Coatings for the Hydrogen Economy // *Hydrogen*, Vol. 4, 2023. pp. 307–322.
- [23] **Y. Lei, E. Hosseini, L. Liu, C.A. Scholes, S.E. Kentish**, Internal polymeric coating materials for preventing pipeline hydrogen embrittlement and a theoretical model of hydrogen diffusion through coated steel // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, 2022. pp. 31409–31419.
- [24] **S. Yuan, Y. Sun, C. Yang, Y. Zhang, C. Cong, Y. Yuan, D. Lin, L. Pei, Y. Zhu, H. Wang**, A novel dual-functional epoxy-based composite coating with exceptional anti-corrosion and enhanced hydrogen gas barrier properties // *Chemical Engineering Journal*, Vol. 449, 2022. P. 137876.
- [25] **O.B. Seo, S. Saha, N.H. Kim, J.H. Lee**, Preparation of functionalized MXene-stitched-graphene oxide/poly (ethylene-co-acrylic acid) nanocomposite with enhanced hydrogen gas barrier properties // *Journal of Membrane Science*, Vol. 640, 2021. P. 119839.
- [26] **K. Shi, S. Xiao, Q. Ruan, H. Wu, G. Chen, C. Zhou, S. Jiang, K. Xi, M. He, P.K. Chu**, Hydrogen permeation behavior and mechanism of multi-layered graphene coatings and mitigation of hydrogen embrittlement of pipe steel // *Applied Surface Science*, Vol. 573, 2022. P. 151529.
- [27] **S. Yuan, K. Li, Y. Sun, C. Cong, Y. Liu, D. Lin, L. Pei, Y. Zhu, H. Wang**, Designing functionalized graphene-stitched-SiC/fluoropolymer novel composite coating with excellent corrosion resistance and hydrogen diffusion barrier properties // *Chemical Engineering Journal*, Vol. 472, 2023. P. 144881.
- [28] **K.T. Young, C. Smith, T.M. Krentz, D.A. Hitchcock, E.M. Vogel**, Graphene synthesized by chemical vapor deposition as a hydrogen isotope permeation barrier // *Carbon*, Vol. 176, 2021. pp. 106–117.
- [29] **S.K. Bull, T. Champ, S. Raj, A.W. Weimer, C.B. Musgrave**, Ab initio screening of refractory nitrides and carbides for high temperature hydrogen permeation barriers // *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 563, 2022. P. 153611.

- [30] **M. Tamura, H. Takizawa**, TiAlN/TiMoN Coatings as Hydrogen Barriers // Journal of Materials Science and Engineering A, Vol. 9, February 2019.
- [31] **S. Fite, I. Zukerman, A.B. Shabat, S. Barzilai**, Hydrogen protection using CrN coatings: Experimental and theoretical study // Surfaces and Interfaces, Vol. 37, 2023. P. 102629.
- [32] **L. Liu, Q. Ruan, S. Xiao, X. Meng, C. Huang, Y. Wu, R.K.Y. Fu, P.K. Chu**, Fabrication and hydrogen permeation resistance of dense CrN coatings // Surface and Coatings Technology, Vol. 437, 2022. P. 128326.
- [33] **C. de Souza Brandolt, L.C. Noronha, G.E.N. Hidalgo, A.S. Takimi, R.M. Schroeder, C. de Fraga Malfatti**, Niobium coating applied by HVOF as protection against hydrogen embrittlement of API 5CT P110 steel // Surface and Coatings Technology, Vol. 322, 2017. pp. 10–18.
- [34] **F.D. Duminica, X.V. Eynde, M. Mandy, B. Nabi, C. Georges, T. Sturel, P. Drillet, R. Grigorieva**, Investigation of PVD thin films as hydrogen barriers in aluminized press hardened steels (PHS) // Surface and Coatings Technology, Vol. 397, 2020. P. 125940.
- [35] **I. Lakdhar, A. Alhoussein, J. Capelle, J. Creus**, Al-Ti-W alloys deposited by magnetron sputtering: Effective barrier to prevent steel hydrogen embrittlement // Applied Surface Science, Vol. 567, 2021. P. 150786.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Ivan S. SOKOLOV – *Moscow Power Engineering Institute (Technical University)*.

E-mail: sokolviv@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1829-656X>

Marat R. DASAEV – *Moscow Power Engineering Institute (Technical University)*.

E-mail: DasayevMR@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9477-8264>

Artem V. RYZHENKOV – *Moscow Power Engineering Institute (Technical University)*.

E-mail: RyzhenkovAV@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2075-1405>

Sergey V. GRIGORYEV – *Moscow Power Engineering Institute (Technical University)*.

E-mail: GrigoryevSVI@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2075-1405>

Ivan A. ROMANOV – *Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences*.

E-mail: romanoff_i_a@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9413-8008>

Marat R. ATAULLIN – *Moscow Power Engineering Institute (Technical University)*.

E-mail: AtaullinMR@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2753-6249>

Поступила: 21.09.2023; Одобрена: 15.10.2023; Принята: 18.10.2023.

Submitted: 21.09.2023; Approved: 15.10.2023; Accepted: 18.10.2023.