

Научная статья

УДК 620.1

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30109>



*М.Р. Дасаев, И.С. Соколов* ✉, *О.В. Рыженков,*  
*С.В. Григорьев, А.Ю. Лихаева, М.Р. Атауллин*

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

✉ [sokolviv@inbox.ru](mailto:sokolviv@inbox.ru)

## **ПРИМЕНЕНИЕ PVD-ПОКРЫТИЙ РАЗЛИЧНОЙ ТОЛЩИНЫ НА ОСНОВЕ Cr ДЛЯ ЗАМЕДЛЕНИЯ ВОДОРОДНОГО ОХРУПЧИВАНИЯ СТАЛИ**

*Аннотация.* В условиях активного развития альтернативных источников энергии проблема водородного охрупчивания ответственных элементов конструкций несомненно требует внимания. Ухудшение прочностных характеристик конструкционных материалов в контакте с водородсодержащими средами значительно повышает требования к их надежности и снижает технико-экономическую целесообразность использования водорода. В данной работе представлены результаты металлографических исследований и механических испытаний экспериментальных образцов из стали Ст20 с барьерным покрытием толщиной  $\approx 2$  мкм и  $\approx 4$  мкм на основе хрома (Cr), нанесенным с использованием PVD (Physical Vapour Deposition) технологии. Анализ морфологии и структуры покрытия, а также фрактограмм поверхности излома экспериментальных образцов показал отсутствие структурных изменений при наводороживании образцов. По результатам испытаний на растяжение отмечен положительный эффект использования барьерных покрытий большей толщины. Экспериментальные образцы с барьерным покрытием большей толщины продемонстрировали меньшее ухудшение прочностных характеристик, по сравнению с контрольным наводороженным образцом без барьерного покрытия отмечено двукратное снижение скорости ухудшения значений деформации и четырехкратное снижение скорости ухудшения предела прочности.

*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:*

Дасаев М.Р., Соколов И.С., Рыженков О.В. и др. Применение PVD-покрытий различной толщины на основе Cr для замедления процесса водородного охрупчивания стали // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 1. С. 146–157. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30109>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30109>

M.R. Dasaev, I.S. Sokolov  , O.V. Ryzhenkov,  
S.V. Grigoryev, A.Y. Likhaeva, M.R. Ataullin

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

 sokolviv@inbox.ru

## APPLICATION OF CR-BASED PVD COATINGS OF DIFFERENT THICKNESSES FOR RETARDING HYDROGEN EMBRITTLEMENT OF STEEL

*Abstract.* In the context of active development of alternative energy sources, the problem of hydrogen embrittlement of critical structural elements undoubtedly requires attention. Deterioration of strength characteristics of structural materials in contact with hydrogen-containing media significantly increases the requirements for their reliability and reduces the technical and economic feasibility of using hydrogen. This paper presents the results of metallographic studies and mechanical tests of experimental St20 steel samples with a barrier coating with thickness of  $\approx 2 \mu\text{m}$  and  $\approx 4 \mu\text{m}$  on the basis of chromium (Cr), applied using PVD (Physical Vapour Deposition) technology. Analysis of morphology and structure of the coating, as well as fractograms of the fracture surface of the experimental samples showed the absence of structural changes during hydrogenation of the samples. According to the results of tensile tests, the positive effect of using barrier coatings of greater thickness was noted. Experimental samples with barrier coating of greater thickness showed less deterioration of strength characteristics, compared to the control hydrogenated sample without barrier coating. We observed a twofold decrease in the rate of deterioration of strain values and a fourfold decrease in the rate of deterioration of the tensile strength.

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

*Acknowledgements:* The work was carried out within the framework of the project “Development of technological foundations for protection against hydrogen embrittlement of steels” with the support of a grant from the National Research University “MPEI” for the implementation of the scientific research program “Priority 2030: Technologies of the Future” in 2022–2024.

*Citation:*

M.R. Dasaev, I.S. Sokolov, O.V. Ryzhenkov and etc., Application of Cr-based PVD coatings of different thicknesses for retarding the process of hydrogen embrittlement of steel, *Global Energy*, 30 (01) (2024) 146–157, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30109>

**Введение.** Среди перспективных нетрадиционных источников энергии водород выделяется широтой возможного спектра применения [1]. Он может быть использован для накопления энергии, в том числе выработанной на возобновляемых источниках энергии, в топливных ячейках, для транспорта энергии, в качестве топлива для автомобильного транспорта, а также широко применяется в химической и металлургической промышленности [2]. Однако, так как водород способен интенсивно диффундировать в большинство конструкционных материалов [3–5], взаимодействуя с кристаллической решеткой и вызывая ухудшение прочностных свойств с последующим потенциальным разрушением подверженного воздействию элемента конструкции [6–7], его применение ограничивается необходимостью обеспечения высокой надежности элементов, неизбежно ведущей к снижению экономической целесообразности развития водородных технологий [8–10].

Водородное охрупчивание, возникающее в высокопрочных сталях, используемых в системах хранения, генерации и транспорта водорода [11], связано с тем, что атомы водорода, встраиваясь в кристаллическую решетку металла значительно снижают его прочность и пластичность [12–13]. Материал становится более хрупким, а его устойчивость к усталостному разрушению и предел прочности снижаются [14–15].

При этом водород может взаимодействовать с различными составляющими стали: встраивание атомов водорода в междоузлия кристаллической решетки железа, как было отмечено ранее, ведет к водородному охрупчиванию [16]; взаимодействие водорода с углеродом приводит к формированию метана, вызывающего внутреннее порообразование, и разрушение стали; водород формирует гидридные соединения с магнием, что ведет к хрупкости, а при реакции с серой образуется сероводород, также приводящий к возникновению трещин. В то же время, никель и хром выступают в роли водородной ловушки, адсорбируя и удерживая атомы водорода и предотвращая охрупчивание [17].

В табл. 1 приведен перечень основных элементов, входящих в состав сталей и их влияние на характер взаимодействия с водородом.

Таблица 1  
**Влияние элементов в составе стали на характер взаимодействия с водородом [17]**

Table 1  
**Influence of elements in the composition of steel on the way of interaction with hydrogen [17]**

Элемент	Количество водородных ловушек	Диффузия водорода	Старение стали
Алюминий (Al)	–	снижается	–
Молибден (Mo)	увеличивается	–	увеличивается
Магний (Mg)	–	увеличивается	–
Медь (Cu)	–	снижается	–
Ниобий (Nb)	увеличивается	увеличивается	увеличивается
Хром (Cr)	увеличивается	снижается	увеличивается
Углерод (C)	–	увеличивается	–
Никель (Ni)	–	снижается	–
Титан (Ti)	увеличивается	–	увеличивается
Кремний (Si)	–	снижается	–
Ванадий (V)	увеличивается	–	увеличивается
Сера (S)	–	увеличивается	–
Фосфор (P)	–	увеличивается	–

На данный момент существует множество перспективных методов защиты от водородного охрупчивания, среди которых наиболее популярными являются [18–22]: подбор материала, устойчивого к воздействию водорода; использование барьерных покрытий; обработка поверхности материала.

В данной работе исследуется эффективность барьерного покрытия различной толщины на основе Cr, нанесенного с использованием PVD технологии. Так как основной причиной охрупчивания является диффузия атомов водорода в объем стали, рассматриваемое покрытие позволит значительно замедлить данный процесс вследствие более плотной структуры и значительной водородной емкости хрома, отличающегося большим количеством водородных ловушек.

При этом PVD-покрытия характеризуются высокой износо-, термо- и коррозионной стойкостью, что обеспечивает возможность применения данных покрытий для ответственных элементов систем, работающих в контакте с коррозионно-активными и агрессивными средами при высоких значениях давления и температуры.

### Материалы и методы

В качестве исходного материала для изготовления экспериментальных образцов в данной работе была выбрана обогащенная углеродом конструкционная сталь Ст20. Химический состав стали Ст20 приведен в табл. 2.

Таблица 2

#### Химический состав стали Ст20

Table 2

#### Chemical composition of St20 steel

Элемент	Доля, %
Углерод (C)	0,17 – 0,24
Кремний (Si)	0,17 – 0,37
Марганец (Mn)	0,35 – 0,65
Сера (S)	< 0,04
Фосфор (P)	< 0,04
Никель (Ni)	< 0,25
Хром (Cr)	< 0,25
Медь (Cu)	< 0,25
Мышьяк (As)	< 0,08
Железо (Fe)	~98

Условия проведения механических испытаний, а также характеристики исследуемых экспериментальных образцов аналогичны приведенным в работе [23].

Процесс наводороживания экспериментальных образцов производился с использованием установки УС-150 (ОИВТ РАН), основные элементы установки и интерфейс программы управления приведены в работе [23].

Перед началом процесса наводороживания в рабочем сосуде установки обеспечивалось давление не более 10 Па, после чего производился нагрев вакуумированного сосуда до температуры 423 К. В процессе наводороживания использовался водород высокой чистоты при давлении не менее 9 МПа. Экспериментальные образцы выдерживались в атмосфере водорода при указанных параметрах в течение 8 часов, после чего остужались и производилось извлечение образцов.

Барьерное покрытие на основе Cr формировалось в вакуумной установке «Гефест+» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»). Более подробно процесс подготовки к формированию покрытия описан в работе [23].

В рамках исследования использовалась следующая маркировка экспериментальных образцов: ибп – исходный образец без покрытия; нбп – наводороженный образец без покрытия; ип2 – исходный образец с покрытием толщиной  $\approx 2$  мкм; нп2 – наводороженный образец с покрытием толщиной  $\approx 2$  мкм; ип4 – исходный образец с покрытием толщиной  $\approx 4$  мкм; нп4 – наводороженный образец с покрытием, толщиной  $\approx 4$  мкм.

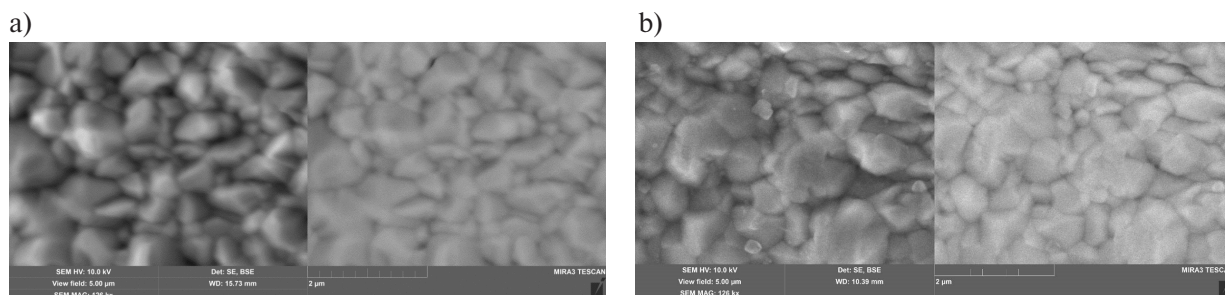


Рис. 1. Фотоснимки поверхности экспериментальных образцов с барьерным покрытием до наводороживания (а) и после наводороживания (б), полученные с использованием электронной микроскопии

Fig. 1. Electron microscopy images of the surface of experimental samples with barrier coating before hydrogenation (a) and after hydrogenation (b)

Толщина покрытия измерялась с использованием толщиномера покрытий PosiTector 6000 F90S1. Микроструктура экспериментальных образцов была исследована с использованием растрового микроскопа Tescan Mira LMU.

В области на удалении от разрыва проводились исследования микротвердости шлифов, изготовленных из экспериментальных образцов до и после наводороживания. Измерение микротвердости по Виккерсу проводилось для исходного и наводороженного экспериментальных образцов без барьерного покрытия, а также для исходного и наводороженного экспериментальных образцов с барьерным покрытием толщиной  $\approx 2$  мкм, с использованием твердомера для малых нагрузок DuraScan 20. Измерения микротвердости проводились при нагрузке 0,01 кгс (0,098 Н) на глубине от  $5\div 7$  мкм до  $\approx 150$  мкм для образцов без барьерного покрытия и на глубине от  $5\div 7$  мкм до  $\approx 300$  мкм для образцов с барьерным покрытием.

### Результаты и обсуждение

Морфология полученного барьерного покрытия для исходного и наводороженного экспериментальных образцов с барьерным покрытием толщиной  $\approx 2$  мкм представлена на рис. 1.

Как видно из рис. 1, у полученного покрытия наблюдается зернистая структура поверхности с размером зерна от 0,2 до 1,3 мкм. При этом не отмечено значимых различий структуры исходного и наводороженного экспериментальных образцов.

Характерный вид микроструктуры поверхностного слоя, полученный с использованием микроскопа TESCAN MIRA 3 LMU в режиме обратно-отраженных электронов, приведен на рис. 2.

Хромовое покрытие имеет столбчатую структуру, характерную как для наводороженного (см. рис. 2, б), так и для не подвергавшегося наводороживанию (см. рис. 2, а) экспериментальных образцов. Достигнута сплошность покрытия, обеспечивающая барьерный эффект в процессе наводороживания. Структура и морфология экспериментальных образцов с различной толщиной покрытия не имеют значимых различий.

На рис. 3 представлены фрактограммы поверхности излома для исходного и наводороженного экспериментальных образцов с барьерным покрытием толщиной  $\approx 2$  мкм.

В соответствии с представленными изображениями поверхность экспериментальных образцов в области разрыва имеет вид ямочного вязкого среза. На изображениях отсутствуют фасетки и сколы, характеризующие хрупкий характер разрушения. Таким образом, можно сделать вывод об отсутствии значимых структурных изменений характера разрушения исследуемого материала при наводороживании. Фрактограммы поверхности экспериментальных образцов с толщиной покрытия  $\approx 4$  мкм не имеют значимых отличий от представленных, так как увеличение толщины покрытия характеризуется повышением барьерного эффекта.



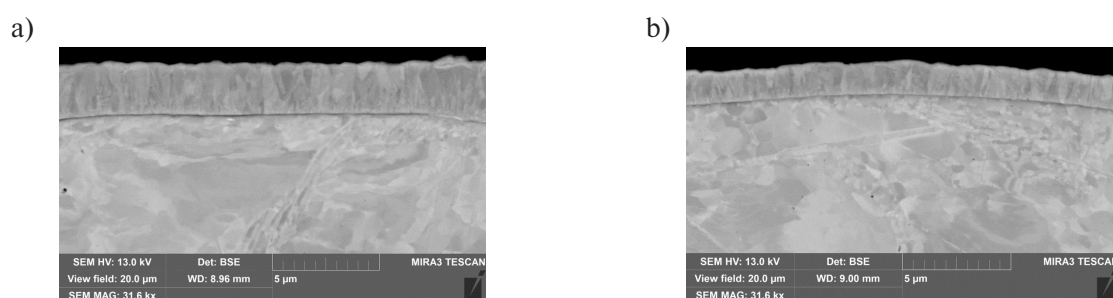


Рис. 2. Микроструктура барьерного покрытия экспериментального образца со средней толщиной  $\sim 2$  мкм без наводороживания (a) и после наводороживания (b)

Fig. 2. Microstructure of the barrier coating of the experimental sample with an average thickness of  $\sim 2$  microns without hydrogenation (a) and after hydrogenation (b)

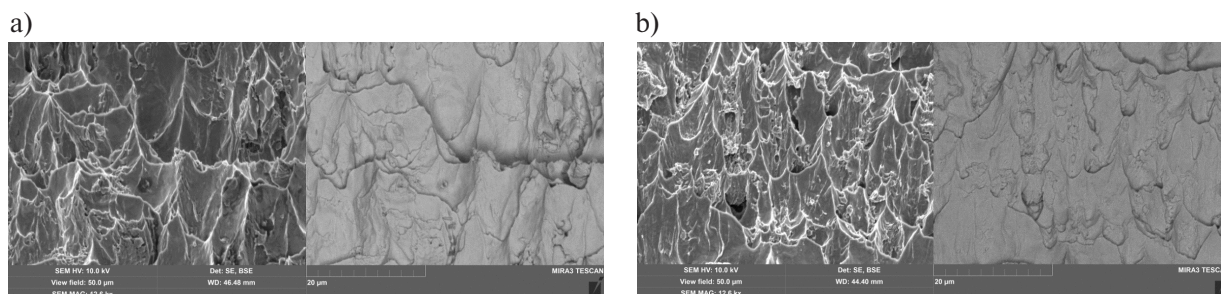


Рис. 3. Фрактограммы поверхности излома экспериментальных образцов с барьерным покрытием толщиной  $\approx 2$  мкм: исходного (a), наводороженного (b)

Fig. 3. Fractograms of fracture surface of experimental samples with barrier coating with thickness  $\approx 2$   $\mu\text{m}$ : initial (a), hydrogenated (b)

Значение микротвердости для исходного экспериментального образца без барьерного покрытия в поверхностном слое на глубине до  $\approx 20$  мкм в среднем составило  $(178 \pm 8)$  HV, с постепенным снижением при отдалении от поверхности, до  $(158 \pm 7)$  HV. Для наводороженного экспериментального образца без барьерного покрытия микротвердость в поверхностном слое на глубине до  $\approx 20$  мкм в среднем составила  $(205 \pm 10)$  HV, затем постепенно снижалась до достижения значения  $(171 \pm 7)$  HV. С учетом средних значений повышение микротвердости по результатам процесса наводороживания для экспериментальных образцов без барьерного покрытия составило  $\approx 20$  HV.

Для экспериментального образца без наводороживания микротвердость стали 20 в приповерхностном слое как в среднем по глубине от  $\approx 7$  до  $\approx 100$  мкм, так и в среднем по глубине от  $\approx 7$  до  $\approx 300$  мкм, составила  $(212 \pm 10)$  HV. На экспериментальном образце, подвергнутом наводороживанию, микротвердость стали 20 в приповерхностном слое на глубине до  $\approx 100$  мкм в среднем составила  $(206 \pm 9)$  HV; в среднем по глубине от  $\approx 7$  до  $\approx 300$  мкм микротвердость составила  $(209 \pm 9)$  HV. Таким образом, для экспериментальных образцов с барьерным покрытием отмечается повышенное значение приповерхностной микротвердости, вызванное термической обработкой в процессе нанесения покрытия.

Выявлено повышение микротвердости экспериментального образца без барьерного покрытия при наводороживании, вызванное закреплением подвижных дислокаций в материале атомами водорода. При этом для экспериментального образца с барьерным покрытием значение микротвердости при наводороживании изменяется незначительно, что характеризует барьерные свойства покрытия. Таким образом, на основе результатов металлографических исследований

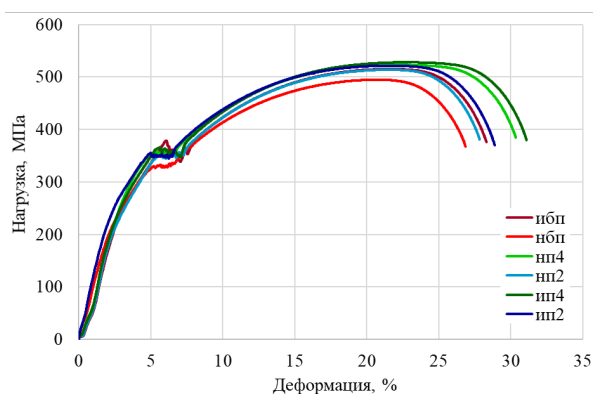


Рис. 4. Диаграммы деформации для испытанных экспериментальных образцов  
 Fig. 4. Deformation diagrams for tested experimental samples

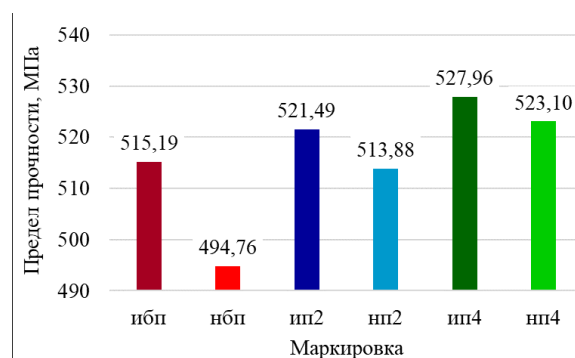


Рис. 5. Значения предела прочности для экспериментальных образцов  
 Fig. 5. Tensile strength values for experimental samples

можно сделать вывод о наличии барьерного эффекта для покрытия на основе Cr, который обеспечивает защиту от воздействия водородной среды при рассмотренных условиях наводороживания.

С целью определения степени изменения прочностных свойств материала при наводороживании были проведены испытания на растяжение для каждого из исследуемых экспериментальных образцов. По результатам испытаний на растяжение были получены диаграммы деформации экспериментальных образцов, представленные на рис. 4.

В соответствии с представленными на рис. 4 диаграммами деформации можно отметить снижение прочностных свойств для экспериментального образца без покрытия, подвергнутого наводороживанию.

Относительное снижение значения деформации при разрыве для наводороженного экспериментального образца без барьерного покрытия по сравнению с исходным экспериментальным образцом составило 5,2 %, в то время как для образцов с покрытием толщиной  $\approx 2$  мкм это значение составило 3,6 %, а для экспериментальных образцов с покрытием толщиной  $\approx 4$  мкм – на 2,4 %. При этом, для экспериментальных образцов с барьерным покрытием толщиной  $\approx 2$  мкм и  $\approx 4$  мкм, не подвергавшихся наводороживанию наблюдается увеличение абсолютных значений деформации при разрыве на 2 % и 7,7 % относительно исходного экспериментального образца без барьерного покрытия, соответственно.

Распределение значений предела прочности для экспериментальных образцов представлено на рис. 5.

Согласно полученным результатам снижение предела прочности для исходного образца без защитного покрытия относительно значений исходного образца составило 3,97 %, в то время как для наводороженного экспериментального образца с покрытием толщиной  $\approx 2$  мкм снижение относительно исходного экспериментального образца с барьерным покрытием толщиной  $\approx 2$  мкм составило 1,46 %, а для наводороженного экспериментального образца с покрытием толщиной  $\approx 4$  мкм отмечено аналогичное снижение предела прочности менее, чем на 1 %.

Таким образом, двукратное увеличение толщины покрытия обеспечило стабильность прочностных характеристик при исследуемых параметрах наводороживания.

### Заключение

В рамках работы проведены металлографические исследования характеристик барьерного покрытия и приповерхностного слоя экспериментальных образцов из стали Ст20 и их изменений, вызванных воздействием водорода. В соответствии с проведенными результатами сделан вывод о наличии барьерного эффекта у покрытий на основе Сг толщиной  $\approx 2$  мкм и  $\approx 4$  мкм, обеспечивающего неизменность структуры и морфологии покрытия, а также приповерхностной области материала при испытаниях на растяжение. Выявлено увеличение приповерхностной микротвердости у экспериментальных образцов с барьерным покрытием, вызванное термической обработкой в процессе нанесения покрытия.

По результатам испытаний на растяжение отмечено снижение значения деформации при разрыве для наводороженного образца с покрытием толщиной  $\approx 2$  мкм по сравнению с исходным образцом с покрытием толщиной  $\approx 2$  мкм на 3,6 %, в то время как для наводороженного образца без барьерного покрытия снижение относительно контрольного образца составило 5,2 %. Для наводороженного образца с покрытием толщиной  $\approx 4$  мкм отмечено снижение значения деформации на 2,4 % по сравнению с исходным образцом с покрытием толщиной  $\approx 4$  мкм. При этом, стоит учитывать, что исходные значения деформации при разрыве для не подвергавшихся наводороживанию образцов с покрытием толщиной  $\approx 2$  мкм и  $\approx 4$  мкм превосходят данные значения для контрольного образца на 2 % и 7,7 %, соответственно.

Таким образом, выявлено снижение интенсивности воздействия водорода на пластичность материала более чем в 2 раза для экспериментального образца с барьерным покрытием толщиной  $\approx 4$  мкм.

Схожую картину демонстрируют полученные значения предела прочности. Снижение предела прочности для наводороженного образца без барьерного покрытия относительно контрольного образца составило 3,97 %, в то время как снижение для наводороженного образца с покрытием толщиной  $\approx 2$  мкм относительно исходного образца с покрытием толщиной  $\approx 2$  мкм и снижение для наводороженного образца с покрытием толщиной  $\approx 4$  мкм относительно исходного образца с покрытием толщиной  $\approx 4$  мкм составили 1,46 % и менее 1 % соответственно.

Увеличение толщины барьерного покрытия не только положительно влияет на сопротивляемость материала наводороживанию, но также повышает износостойкость покрытия, при условии, что не будет превышен предел толщины при котором начинает снижаться адгезия. Однако, целесообразность увеличения толщины барьерного покрытия должна оцениваться с технико-экономической точки зрения с учетом предполагаемого срока эксплуатации элемента, находящегося в контакте с водородсодержащей средой и параметров данной среды, так как для покрытий большей толщины требуется повышение продолжительности процесса нанесения, что влечет дополнительные затраты.



## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Zhang L., Jia C., Bai F., Wang W., An S., Zhao K., Li Z., Li J., Sun H.** A comprehensive review of the promising clean energy carrier: Hydrogen production, transportation, storage, and utilization (HPTSU) technologies // *Fuel*, Vol. 355, 2024. P. 129455.
- [2] **Oshiro K., Fujimori S.** Role of hydrogen-based energy carriers as an alternative option to reduce residual emissions associated with mid-century decarbonization goals // *Applied Energy*, Vol. 313, 2022. P. 118803.
- [3] **Gong P., Turk A., Nutter J., Yu F., Wynne B., del-Castillo P.R.D., Rainforth W.M.** Hydrogen embrittlement mechanisms in advanced high strength steel // *Acta Materialia*, Vol. 223, 2022. P. 117488.
- [4] **Okonkwo P.C., Barhoumi E.M., Belgacem I.B., Mansir I.B., Aliyu M., Emori W., Uzoma P.C., Beitelmal W.H., Akyüz E., Radwan A.B., Shakoор R.A.** A focused review of the hydrogen storage tank embrittlement mechanism process // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, 2023. pp. 12935–12948.
- [5] **Mao L.Y., Luo Z.A., Huang C., Zhang X.M.** Hydrogen embrittlement behavior in interstitial Mn–N austenitic stainless steel // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, 2022. pp. 36716–36732.
- [6] **Rodoni E., Verbeke K., Depover T., Iannuzzi M.** Effect of microstructure on the hydrogen embrittlement, diffusion, and uptake of dual-phase low alloy steels with varying ferrite-martensite ratios // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 50, 2024. pp. 53–65.
- [7] **Huang S., Hui H., Peng J.** Prediction of hydrogen-assisted fracture under coexistence of hydrogen-enhanced plasticity and decohesion // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, 2023. pp. 36987–37000.
- [8] **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.
- [9] **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.
- [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] **Jia G., Lei M., Li M., Xu W., Li R., Lu Y., Cai M.** Hydrogen embrittlement in hydrogen-blended natural gas transportation systems: A review // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, 2023. pp. 32137–32157.
- [12] **Álvarez G., Harris Z., Wada K., Rodríguez C., Martínez-Pañeda E.** Hydrogen embrittlement susceptibility of additively manufactured 316L stainless steel: Influence of post-processing, printing direction, temperature and pre-straining // *Additive Manufacturing*, Vol. 78, 2023. P. 103834.
- [13] **Barrera O., Bombac D., Chen Y., Daff T.D., Galindo-Nava E., Gong P., Haley D., Horton R., Katarov I., Kermode J.R., Liverani C., Stopher M., Sweeney F.** Understanding and mitigating hydrogen embrittlement of steels: a review of experimental, modelling and design progress from atomistic to continuum // *Journal of Materials Science*, Vol. 53, 2018. pp. 6251–6290.
- [14] **Kumar R., Arora A., Mahajan D.K.** Hydrogen-assisted intergranular fatigue crack initiation in metals: Role of grain boundaries and triple junctions // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, 2023. pp. 16481–16500.
- [15] **Fukunaga A.** Effect of high-pressure hydrogen environment in elastic and plastic deformation regions on slow strain rate tensile tests for iron-based superalloy A286 // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, 2023. pp. 18116–18128.
- [16] **Xi X., Liu Z., Qin Z., Wu T., Wang J., Xu N., Chen L.** Enhancement of the resistance to hydrogen embrittlement by tailoring grain boundary characteristics in a low carbon high strength steel // *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 27, 2023. pp. 7119–7127.
- [17] **Shehata M.F., El-Shamy A.M.** Hydrogen-based failure in oil and gas pipelines a review // *Gas Science and Engineering*, Vol. 115, 2023. P. 204994.

- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Ke N., Huang H., Wang F., Dong B., Huang A., Hao L., Xu X. Study on the hydrogen barrier performance of the SiOC coating // International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 48, 2023. pp. 8286–8295.
- [21] Luo Z.A., Mao L.Y., Huang C., Zhou H.Y., Wang M.K. A strategy for simultaneously enhancing mechanical strength and hydrogen embrittlement resistance: Exceptional performance of laminated metal composite in hydrogen environments // Materials & Design, Vol. 237, 2024. P. 112549.
- [22] Tamura M., Takizawa H. TiAlN/TiMoN Coatings as Hydrogen Barriers // Journal of Materials Science and Engineering A, Vol. 9, February 2019.
- [23] Дасаев М.Р., Соколов И.С., Рыженков А.В., Григорьев С.В., Атауллин М.Р., Романов И.А. Исследование применения PVD-покрытия на основе Cr с целью защиты от водородного охрупчивания сталей // Глобальная энергия. 2024. Т. 29, № 4. С. 107–119. DOI: 10.18721/JEST.29407

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**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>

**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>

**РЫЖЕНКОВ Олег Вячеславович** – ведущий инженер, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский энергетический институт (технический университет)», канд. техн. наук.

E-mail: sokolviv@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6434-6148>

**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>

**ЛИХАЕВА Алена Юрьевна** – младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский энергетический институт (технический университет)», без степени.

E-mail: LikhayevaAY@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4920-7040>

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

E-mail: AtaullinMR@mpei.ru

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

## REFERENCES

- [1] **Zhang L., C. Jia, F. Bai, W. Wang, S. An, K. Zhao, Z. Li, J. Li, H. Sun**, A comprehensive review of the promising clean energy carrier: Hydrogen production, transportation, storage, and utilization (HPTSU) technologies // *Fuel*, Vol. 355, 2024. P. 129455.
- [2] **K. Oshiro, S. Fujimori**, Role of hydrogen-based energy carriers as an alternative option to reduce residual emissions associated with mid-century decarbonization goals // *Applied Energy*, Vol. 313, 2022. P. 118803.
- [3] **P. Gong, A. Turk, J. Nutter, F. Yu, B. Wynne, P.R.D. del-Castillo, W.M. Rainforth**, Hydrogen embrittlement mechanisms in advanced high strength steel // *Acta Materialia*, Vol. 223, 2022. P. 117488.
- [4] **P.C. Okonkwo, E.M. Barhoumi, I.B. Belgacem, I.B. Mansir, M. Aliyu, W. Emori, P.C. Uzoma, W.H. Beitelmal, E. Akyüz, A.B. Radwan, R.A. Shakoob**, A focused review of the hydrogen storage tank embrittlement mechanism process // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, 2023. pp. 12935–12948.
- [5] **L.Y. Mao, Z.A. Luo, C. Huang, X.M. Zhang**, Hydrogen embrittlement behavior in interstitial Mn–N austenitic stainless steel // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, 2022. pp. 36716–36732.
- [6] **E. Rodoni, K. Verbeke, T. Depover, M. Iannuzzi**, Effect of microstructure on the hydrogen embrittlement, diffusion, and uptake of dual-phase low alloy steels with varying ferrite-martensite ratios // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 50, 2024. pp. 53–65.
- [7] **S. Huang, H. Hui, J. Peng**, Prediction of hydrogen-assisted fracture under coexistence of hydrogen-enhanced plasticity and decohesion // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, 2023. pp. 36987–37000.
- [8] **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.
- [9] **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.
- [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] **G. Jia, M. Lei, M. Li, W. Xu, R. Li, Y. Lu, M. Cai**, Hydrogen embrittlement in hydrogen-blended natural gas transportation systems: A review // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, 2023. pp. 32137–32157.
- [12] **G. Álvarez, Z. Harris, K. Wada, C. Rodríguez, E. Martínez-Pañeda**, Hydrogen embrittlement susceptibility of additively manufactured 316L stainless steel: Influence of post-processing, printing direction, temperature and pre-straining // *Additive Manufacturing*, Vol. 78, 2023. P. 103834.
- [13] **O. Barrera, D. Bombac, Y. Chen, T.D. Daff, E. Galindo-Nava, P. Gong, D. Haley, R. Horton, I. Katarov, J.R. Kermode, C. Liverani, M. Stopher, F. Sweeney**, Understanding and mitigating hydrogen embrittlement of steels: a review of experimental, modelling and design progress from atomistic to continuum // *Journal of Materials Science*, Vol. 53, 2018. pp. 6251–6290.
- [14] **R. Kumar, A. Arora, D.K. Mahajan**, Hydrogen-assisted intergranular fatigue crack initiation in metals: Role of grain boundaries and triple junctions // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, 2023. pp. 16481–16500.
- [15] **A. Fukunaga**, Effect of high-pressure hydrogen environment in elastic and plastic deformation regions on slow strain rate tensile tests for iron-based superalloy A286 // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, 2023. pp. 18116–18128.
- [16] **X. Xi, Z. Liu, Z. Qin, T. Wu, J. Wang, N. Xu, L. Chen**, Enhancement of the resistance to hydrogen embrittlement by tailoring grain boundary characteristics in a low carbon high strength steel // *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 27, 2023. pp. 7119–7127.
- [17] **M.F. Shehata, A.M. El-Shamy**, Hydrogen-based failure in oil and gas pipelines a review // *Gas Science and Engineering*, Vol. 115, 2023. P. 204994.

- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] N. Ke, H. Huang, F. Wang, B. Dong, A. Huang, L. Hao, X. Xu, Study on the hydrogen barrier performance of the SiOC coating // *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, 2023. pp. 8286–8295.
- [21] Z.A. Luo, L.Y. Mao, C. Huang, H.Y. Zhou, M.K. Wang, A strategy for simultaneously enhancing mechanical strength and hydrogen embrittlement resistance: Exceptional performance of laminated metal composite in hydrogen environments // *Materials & Design*, Vol. 237, 2024. P. 112549.
- [22] M. Tamura, H. Takizawa, TiAlN/TiMoN Coatings as Hydrogen Barriers // *Journal of Materials Science and Engineering A*, Vol. 9, February 2019.
- [23] M.R. Dasayev, I.S. Sokolov, A.V. Ryzhenkov, S.V. Grigoryev, M.R. Ataulin, I.A. Romanov, Issledovaniye primeneniya PVD-pokrytiya na osnove Cr s tselyu zashchity ot vodorodnogo okhrupchivaniya staley // *Globalnaya energiya*. 2024. T. 29, № 4. S. 107–119. DOI: 10.18721/JEST.29407

### INFORMATION ABOUT AUTHORS

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

E-mail: DasayevMR@mpei.ru

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

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

E-mail: sokolviv@inbox.ru

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

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

E-mail: sokolviv@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6434-6148>

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

E-mail: GrigoryevSVI@mpei.ru

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

**Alena Y. LIKHAeva** – *Moscow Power Engineering Institute (Technical University)*.

E-mail: LikhayevaAY@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4920-7040>

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

E-mail: AtaulinMR@mpei.ru

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

Поступила: 26.02.2024; Одобрена: 01.03.2024; Принята: 06.03.2024.

Submitted: 26.02.2024; Approved: 01.03.2024; Accepted: 06.03.2024.