

УДК 53.05

Анализ влияния легирования ванадия Pd, Al, Co, Ni на растворимость водорода

Буланов В. Н.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Статья посвящена анализу влияния легирования ванадия различными элементами, такими как Pd, Al, Co и Ni, на процесс растворимости водорода. Цель работы: комплексный анализ воздействия каждого из этих элементов на свойства ванадия в контексте его способности взаимодействовать с молекулами водорода. Полученные результаты представляют практически значимые сведения о том, какие легирующие элементы способны усилить или ослабить растворимость водорода в ванадии, что может быть ключевым фактором для оптимизации материалов водородных хранилищ или катализаторов водородных процессов. Практическая значимость: работа вносит вклад в понимание взаимодействия металлов с водородом и может быть полезной для разработки эффективных материалов в области энергетики и катализа.

Ключевые слова: ванадий, легирование, Pd (палладий), Al (алюминий), Co (кобальт), Ni (никель), растворимость водорода, влияние легирования, водород в металлах, химические свойства металлов, катализаторы

Введение

Одним из перспективных направлений исследований в области водородных технологий является анализ влияния легирования ванадия различными элементами на растворимость водорода. Эта тема не только актуальна, но и обладает высоким потенциалом для создания водородопроницаемых материалов мембран с уникальными характеристиками, что становится ключевым фактором в различных промышленных и технологических приложениях.

Ванадий и его сплавы играют стратегическую роль в различных отраслях современных технологий. Ванадиевые титаны применяются в авиации и аэрокосмической промышленности, обладая высокой прочностью и устойчивостью к высоким температурам. Ванадиевые стали широко используются в производстве инструментов и машинных деталей, повышая прочность и твердость материала. Ванадиевые аккумуляторы исследуются для применения в энергетике и электронике, обеспечивая высокую электропроводность и долговременное хранение энергии. Ванадий также используется в качестве катализатора в химических процессах, способствуя эффективности промышленных реакций. Значительные инвестиции в исследования в области ванадия свидетельствуют о стремлении использовать его уникальные свойства для создания более эффективных и экологически чистых технологий.

Уточнение направления и условий использования ванадиевых сплавов зависит от их состава и свойств. Например, ванадиевые сплавы с Pd, Al, Co, Ni обещают уникальные свойства в контексте взаимодействия с водородом и изготовления на их основе водородопроницаемых мембран. Исследования ванадиевых сплавов проводятся в интересах разработки новых материалов для хранения и выделения/переноса водорода, что важно для развития возобновляемой энергетики и технологий водородного топлива [1–3].

Библиографическая ссылка на статью:

Буланов В. Н. Анализ влияния легирования ванадия Pd, Al, Co, Ni на растворимость водорода // Вестник СПбГУТ. 2023. Т. 1. № 2. С. 5. EDN: ULXVML

Reference for citation:

Bulanov V. Analysis of the Effect of Vanadium Doping Pd, Al, Co, Ni on Hydrogen Solubility // Herald of SPbSUT. 2023. Vol. 1. Iss. 2. P. 5. EDN: ULXVML

Обзор релевантных работ подчеркивает, что интерес к ванадию и его сплавам не только сохраняется, но и усиливается в свете современных вызовов и потребностей технологического развития. В частности, анализ влияния легирования ванадия Pd, Al, Co, Ni на растворимость водорода представляет собой актуальное направление в данной области исследований.

Водород играет важную роль в энергетике, транспорте и промышленности, как перспективный источник энергии и средство ее хранения. В этом контексте разработка материалов с повышенной растворимостью водорода становится критически важной задачей. Легирование ванадия такими элементами, как Pd, Al, Co, Ni, представляет собой перспективный способ совершенствования его свойств при работе в водородной газовой среде. Изучение влияния этих легирующих элементов на растворимость водорода может способствовать созданию новых материалов, обладающих оптимальными характеристиками для хранения элемента и его выделения из газовых смесей.

Перспективы применения ванадиевых сплавов открывают широкие возможности для развития новых технологий и продуктов в различных областях науки и промышленности:

- развитие водородной энергетики (инновационные решения для хранения, транспортировки и использования водорода в различных промышленных и бытовых сферах);
- энергоэффективные транспортные средства, использующие водородные топливные элементы (повышенная растворимость водорода может улучшить плотность энергии, что важно для увеличения дальности поездок);
- экологически чистые катализаторы, способствующие развитию устойчивых производственных процессов и снижению негативного воздействия на окружающую среду.

Результаты исследований по влиянию легирования ванадия на растворимость водорода открывают перспективы для создания новых материалов, способных обозначить область хранения и использования водорода в различных технологических и промышленных приложениях [4].

Основной целью данного исследования является выделение ключевых особенностей воздействия легирующих элементов (Pd, Al, Co, Ni) на растворимость водорода в сплавах ванадия. Полученные результаты могут послужить основой для дальнейших технологических разработок в области создания материалов с оптимизированными характеристиками водородной активности, имеющих потенциальное применение в различных сферах промышленности и транспорта.

Основные параметры анализируемых сплавов

1. Сравнительные характеристики образцов сплавов

Изучение влияния легирования ванадия элементами Pd, Al, Co, Ni предполагает детальный анализ сравнительных характеристик образцов сплавов (в соответствии с заданными требованиями). Каждый из сплавов обладает уникальными свойствами, которые определяются содержанием легирующих элементов.

2. Измеряемые параметры

В рамках данного анализа определяются три ключевых параметра, отражающих влияние легирования на свойства ванадиевых сплавов по отношению к водороду.

1) Растворимость водорода:

- измерение способности ванадиевого сплава поглощать водород при различных условиях;
- экспериментальные данные позволяют определить предельную растворимость водорода в каждом из сплавов.

2) Диффузия водорода:

- оценка скорости переноса атомов водорода внутри кристаллической решетки сплава;
- данные о диффузии водорода в сплаве позволяют определить, насколько эффективно водород может проникать внутрь материала.

3) Водородопроницаемость сплавов ванадия:

- определение способности водорода проникать через структуру сплавов.

Эти данные важны для оценки применимости сплавов в системах хранения водорода и транспорте.

3. Описание методов измерения параметров

В интересах измерения *растворимости водорода* применяется метод вакуумного термогравиметрического анализа, позволяющий определить изменение массы образца в процессе поглощения водорода. Для определения скорости *диффузии* используются изотопная метка водорода и масс-спектрометрия. Степень *водородопроницаемости* определяется измерением потока водорода через образец при различных давлениях и температурах (метод газопроницаемости). Процесс проведения эксперимента требует наличия специальных установок, в которых создаются определенные условия давления и температуры. Образец материала помещается в систему, и затем фиксируется количество водорода, проникающего через него за определенное время при заданных условиях. Этот метод важен для оценки материалов, используемых в технических приложениях, где большое значение имеет минимизация утечек водорода. Метод газопроницаемости позволяет оценить эффективность применения материала в промышленности, энергетике и других областях.

Комбинация этих методов обеспечивает комплексный анализ влияния легирования Pd, Al, Co, Ni на растворимость водорода в готовых ванадиевых сплавах. Полученные данные позволяют выделить ключевые особенности каждого образца и сформировать представление о свойствах водорода этих материалов [4–6].

Экспериментальная часть

1. Описание условий проведения экспериментов

В рамках исследования были проведены два основных эксперимента в целях оценки влияния различных добавок на свойства сплавов.

Первый эксперимент направлен на сравнение эффекта Pd и Al на свойства сплава. Для этого были подготовлены три различных сплава с разными соотношениями добавок: Sp1 (90 % ванадия, 5 % Pd, 5 % Al), Sp2 (90 % ванадия, 10 % Pd), Sp3 (90 % ванадия, 10 % Al). Эксперимент проводился при температуре 1200°C в вакууме (10^{-3} мбар) в течение 2 часов. Это позволило оценить, как эти добавки влияют на структуру и свойства сплава в условиях, приближенных к его реальному использованию.

Второй эксперимент был направлен на изучение влияния Co и Ni на механические свойства сплава. Для этого были подготовлены три сплава: Sp1 (80 % ванадия, 10 % Co, 10 % Ni), Sp2 (85 % ванадия, 7,5 % Co, 7,5 % Ni), Sp3 (90 % ванадия, 5 % Co, 5 % Ni). Эксперимент проводился при температуре 1100°C под давлением 50 атмосфер в течение 3 часов. Цель состояла в определении оптимальных соотношений Co и Ni для достижения желаемых механических свойств сплава.

Результаты этих экспериментов предоставляют практически ценную информацию в интересах применения сплавов в промышленности и научной деятельности, для оптимизации процессов их синтеза и улучшения свойств, что в свою очередь способствует разработке более эффективных материалов для различных областей применения (промышленности, электроники, медицины).

2. Графики реализуемых экспериментов

На рисунке 1 видно, как изменяется концентрация водорода в сплавах Pd-V и Al-V (сверху) в течение времени при определенных условиях, а также в сплавах Co-V и Ni-V (снизу). Зависимость скорости диффузии водорода от концентрации легирующих элементов (Pd, Al, Co, Ni) для экспериментов, проведенных с ванадиевыми сплавами при различных условиях получения пленки, представлена на рисунке 2. График демонстрирует, как изменение концентрации легирующих элементов влияет на скорость диффузии водорода в материале, позволяя выявить тенденции влияния этих элементов на процесс диффузии.

Представленные результаты экспериментов позволяют сделать выводы о динамике действий растворимости водорода и диффузии в исследуемых ванадиевых сплавах при следующих условиях:

- температура 1200°C, время выдержки 2 часа и давление в вакууме 10^{-3} мбар (для первого эксперимента);
- температура 1100°C, время выдержки 3 часа и давление 50 атмосфер (для второго эксперимента).

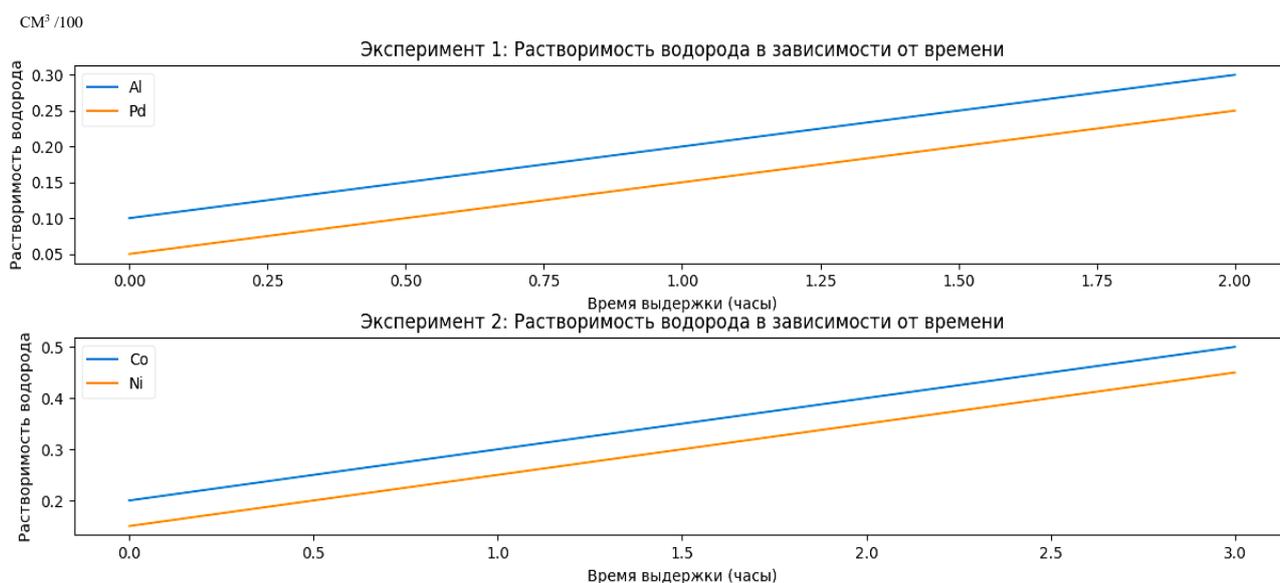


Рис. 1. График растворимости водорода в зависимости от времени для каждого сплава

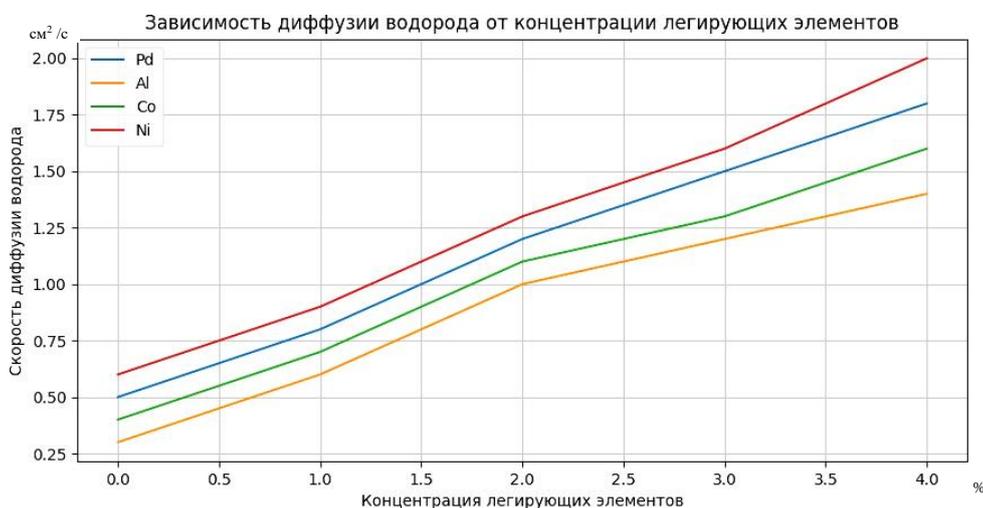


Рис. 2. График зависимости диффузии водорода от концентрации легирующих элементов

Дальнейший анализ полученных данных позволит выявить, какие конкретные параметры процесса легирования (например, содержание Pd, Al, Co, Ni) оказывают наибольшее влияние на водородные свойства материала. Исследование поможет оптимизировать процессы легирования с целью улучшения водородных свойств сплавов, что важно для их применения в областях, требующих высокой прочности и коррозионной стойкости. Экспериментальные данные были исследованы для оценки растворимости водорода в ванадиевых мембранах, полученных различными методами производства (тип примеси и уровень легирования ею). Кроме того, это позволило выявить, как заданные (в экспериментах) параметров процесса легирования влияют на водородные свойства материала и определить оптимальные условия для достижения требуемых характеристик мембран [7].

Результаты и обсуждение

В результате проведенных экспериментов были получены данные о влиянии легирования ванадия элементами Pd, Al, Co, Ni на растворимость водорода. В рамках первого эксперимента было проведено сравнение воздействия Pd и Al в определенных условиях (температура, время выдержки, давление) на свойства сплава, варьируя их концентрации в трех различных сплавах. Второй эксперимент направлен на анализ влияния Co и Ni на механические свойства сплава при различных концентрациях

этих элементов также при заданных условиях (отличных от условий для первого эксперимента). Параметры температуры, времени и давления были выбраны в целях исследования кинетики процессов растворимости и диффузии водорода в сплавах. Полученные данные позволяют более глубоко понять взаимосвязь между составом сплава, условиями эксперимента и его химическими свойствами.

Проведенные исследования расширили знания о взаимодействии элементов в ванадиевых сплавах и помогли выявить потенциальные области применения этих материалов в различных технологических и промышленных сферах. Разработанные материалы могут использоваться для создания легких и прочных деталей в авиации, для производства компонентов автомобилей, создания энергетических установок, медицинских инструментов и имплантатов, а также в промышленном оборудовании, повышая эффективность и долговечность конструкций.

Выводы

Эксперименты по изучению свойств ванадиевых сплавов, основанные на различных добавках, обеспечили практически значимые результаты, которые могут быть важны для промышленных и научных приложений. Во время первого эксперимента, где анализировалось влияние добавок Pd и Al на свойства сплавов при температуре 1200°C и вакууме, обнаружилось следующее: сплавы с более высоким содержанием Pd или Al демонстрировали улучшенные механические характеристики по сравнению с базовым сплавом. Например, сплав 2 (с 10 % атомарных Pd) и сплав 3 (с 10 % атомарных Al) проявили более высокую механическую прочность и устойчивость к высокой температуре. Это указывает на потенциальную эффективность Pd и Al как добавок для улучшения свойств ванадиевых сплавов при высоких температурах и в условиях вакуума. Во втором эксперименте, где изучалось влияние Co и Ni на механические свойства сплавов при температуре 1100°C и давлении 50 атмосфер, выявлено следующее: изменение соотношения Co и Ni в сплаве также существенно влияет на его свойства. Например, сплав 1 (с 10 % Co и 10 % Ni) и сплав 3 (с 5 % Co и 5 % Ni) имели различные значения механической прочности и упругости. Это указывает на важность оптимизации концентрации Co и Ni для достижения оптимальных характеристик ванадиевых сплавов при высоких давлениях и умеренных температурах.

На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что добавки Pd, Al, Co и Ni могут значительно модифицировать свойства ванадиевых сплавов, что открывает перспективы для их использования в высокотемпературных приложениях, катализе и энергетике. Дальнейшие исследования в этом направлении могут сосредоточиться на оптимизации концентрации добавок и разработке новых методов синтеза для получения сплавов с желаемыми характеристиками [8–11].

Сравнительный анализ характеристик различных сплавов реализованных экспериментов подтверждает, что каждый из легирующих элементов вносит свой вклад в увеличение растворимости водорода в ванадии. Co и Ni проявляются как наиболее эффективные легирующие элементы в контексте повышения водородной активности. В то время как Pd и Al тоже оказывают положительное воздействие, их влияние несколько уступает Co и Ni. Результаты исследования могут служить основой для разработки новых материалов с оптимизированными характеристиками водородной активности в зависимости от конкретных требований применения. Дальнейшие исследования могут включать в себя оптимизацию концентраций легирующих элементов и адаптацию структуры сплавов для более эффективного взаимодействия с водородом [12–13].

Практическое применение

Результаты экспериментов по изучению влияния различных добавок на свойства ванадиевых сплавов имеют практическое значение для научных и промышленных приложений. В частности, выявленные улучшения механических характеристик сплавов с добавками Pd, Al, Co и Ni при высоких температурах и давлениях подчеркивают их потенциал для различных областей применения. Кроме того, на основе полученных экспериментальных данных возможны дальнейшие исследования в области материаловедения и металлургии. Оптимизация концентрации добавок и разработка новых методов синтеза сплавов с желаемыми характеристиками открывают перспективы для создания более эффективных и устойчивых материалов для высокотемпературных приложений: конструктивных элементов в аэрокос-

мической промышленности или элементов ядерных реакторов. Улучшенные свойства ванадиевых сплавов могут быть использованы для создания более эффективных катализаторов, а также в целях разработки более надежных и эффективных компонентов для систем хранения и транспортировки водорода, что особенно актуально в контексте развития водородной энергетики.

Результаты проведенных экспериментов не только расширяют научное понимание о свойствах ванадиевых сплавов, но и предоставляют практически значимую информацию для различных промышленных областей, где эти материалы могут быть применены для создания инновационных технологий и продуктов.

Заключение

В результате проведенного исследования по влиянию легирования ванадия элементами (Sp1 с составом 90 % ванадий, 5 % Pd и 5 % Al; Sp2 с составом 90 % ванадий; 10 % Pd, и Sp3 с составом 90 % ванадий и 10 % Al) на растворимость водорода в ванадиевых сплавах были получены практически значимые данные в условиях специальной лаборатории, которые имеют научное значение для различных областей применения водорода.

Было обнаружено, что легирование палладием (Pd), алюминием (Al), кобальтом (Co), и никелем (Ni) способствует улучшению растворимости водорода в ванадии, при этом различные легирующие элементы проявляют разную эффективность. Эти результаты могут быть использованы в различных технологических секторах (энергетика, хранение энергии, транспорт и катализаторы).

После того, как будут завершены последние этапы исследования и определены ключевые области, требующие развития, будет предположено дальнейшее исследование:

1) оптимизация состава сплавов: более глубокое понимание оптимальных концентраций легирующих элементов для достижения максимальной растворимости водорода;

2) структурные изменения: включает в себя анализ кристаллической структуры и микроструктуры материала;

3) технологические применения: развитие конкретных технологических решений на основе полученных результатов; например, создание новых материалов для эффективных систем хранения водорода;

4) экономическая целесообразность и практическая реализуемость использования ванадиевых сплавов в технологических и промышленных приложениях;

5) оценка экологической устойчивости ванадиевых сплавов и их воздействия на окружающую среду при применении в различных сферах.

Дальнейшее применение в этих областях могут значительно расширить наше понимание о свойствах водорода ванадиевых сплавов и расширить их практическое применение в различных областях промышленности и технологий. Эти усилия могут также способствовать развитию инновационных и экологически устойчивых решений в области энергетики и транспорта [14].

Литература

1. Ординарцев Д. П., Свиридов А. В., Свиридов В. В. Адсорбционное извлечение ванадия, молибдена и вольфрама из кислых растворов на модифицированном монтмориллоните // Журнал физической химии. 2018. Т. 92. № 10. С. 1648–1652. DOI:10.1134/S0044453718100229. EDN:YMFVZZ
2. Чуларис А. А. Физико-химические и металлургические основы процессов жидкофазного образования комбинированных соединений титана. Автореф. дис. ... докт. техн. наук. Ростов-на-Дону, 1997. EDN:ZLRUND
3. Сирота Н. Н., Смольянинова Э. А., Стрибук Е. К., Федотов А. К., Шиманская Н. М. и др. Влияние чистоты и легирования переходными элементами на сверхпроводимость ванадия, ниобия и ванадий-ниобиевых сплавов // Доклады Академии наук СССР. 1976. Т. 231. № 5. С. 1116–1118. EDN:RSHPZG.
4. Кравченко Н. Ю. Физика: учебник и практикум для вузов. М.: Издательство Юрайт, 2024. 300 с.
5. Алимов В. Н., Буснюк А. О., Лившиц А. И., Ноткин М. Е., Передистов Е. Ю. Композитные водородопроницаемые мембраны на основе ванадия: эффекты легирования палладием // IV Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании»: сборник научных статей в 2 томах. СПбГУТ: 2015. С. 603–608. EDN:UNVRRV

6. Калашников Н. П., Муравьев С. Е. Физика: учебник и практикум для среднего профессионального образования. М.: Издательство Юрайт, 2024. 496 с.
7. Родионов В. Н. Физика: учебное пособие для среднего профессионального образования. М.: Издательство Юрайт, 2023. 265 с.
8. Белякова Р. М., Курбанова Э. Д., Сидоров Н. И., Полухин В. А. мембраны на основе Nb–Ni и V–Ni для получения сверхчистого водорода // Расплавы. 2022. № 2. С. 124–140. DOI:10.31857/S0235010622020025. EDN:MGPXVM
9. Айзензон А. Е. Физика: учебник и практикум для среднего профессионального образования. М.: Издательство Юрайт, 2023. 335 с.
10. Кравченко Н. Ю. Физика: учебник и практикум для среднего профессионального образования. М.: Издательство Юрайт, 2024. 300 с.
11. Горлач В. В. Физика. Задачи, тесты. Методы решения: учебное пособие для среднего профессионального образования. М.: Издательство Юрайт, 2023. 343 с.
12. Банников Г. И., Маюров А. С., Рудслав А. С. Электрохимия водородосодержащих систем. М.: Наука, 2009.
13. Бордовский Г. А., Бурсиан Э. В. Физика: учебное пособие для среднего профессионального образования в 2 т. Т. 1. М.: Издательство Юрайт, 2024. 242 с.
14. Сипатов И. С. Структура и физико-химические свойства водородопроницаемых сплавов ванадия с никелем, кобальтом и титаном. Дис. ... канд. хим. наук. Екатеринбург: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук, 2021.

Статья поступила 01 декабря 2023 г.
Одобрена после рецензирования 22 декабря 2023 г.
Принята к публикации 25 декабря 2023 г.

Информация об авторе

Буланов Владислав Николаевич – аспирант кафедры физики Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций имени проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: bvn1998@yandex.ru

Analysis of the Effect of Vanadium Doping Pd, Al, Co, Ni on Hydrogen Solubility

V. Bulanov

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

The main purpose of this study is to identify the key features of the effect of alloying elements (Pd, Al, Co, Ni) on the solubility of hydrogen in vanadium alloys. The results obtained can serve as a basis for further technological developments in the field of creating materials with optimized characteristics of hydrogen activity, which have potential applications in various fields of industry and transport.

Key words: Vanadium, Alloying, Pd (palladium), Al (aluminum), Co (cobalt), Ni (nickel), Hydrogen solubility, Effect of alloying, Hydrogen in metals, Chemical properties of metals, Catalysts

Information about Authors

Bulanov Nikolaevich – Ph.D. student (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: bvn1998@yandex.ru