

УДК 543.423.1

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОКИХ СОДЕРЖАНИЙ ВОДОРОДА В ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ ЭМИССИОННЫМ СПЕКТРАЛЬНЫМ МЕТОДОМ

© Т. В. Барашева, Д. М. Давыдов, А. Ф. Летов, И. Г. Тишин¹*Статья поступила 20 июня 2014 г.*

В связи с появлением новых технологических процессов термоводородной обработки титановых сплавов потребовалось определение высоких содержаний водорода в металле. Интерес к составу поверхностных слоев предполагает целесообразность применения спектрального эмиссионного метода анализа. О методике определения десятых долей процента водорода в литературе не сообщалось. Применение условий, рекомендованных отраслевым стандартом, оказалось непригодным. Необходимы также стандартные образцы с высокими содержаниями водорода и новые методические условия для их определения. В ходе работы созданы стандартные образцы предприятия, содержащие от 0,04 до 0,5 % масс. водорода. Исследованы различные способы повышения чувствительности определения высоких содержаний водорода (уменьшение энергии импульсного разряда, замена материала противоиэлектрода на алюминиевый сплав или вольфрам). Разработаны методические условия для определения 0,02 – 0,5 % масс. водорода. Электрическая эрозия пробы по диаметру может составлять от 0,5 до 1,0 мм. Методика может быть использована для анализа ограниченных зон в полуфабрикатах и изделиях и применена для образцов различных форм и размеров.

Ключевые слова: эмиссионный спектральный метод; определение водорода; стандартные образцы состава; импульсный разряд; противоиелектрод; электрическая эрозия пробы; чувствительность; погрешность.

Развитие авиационного и космического машиностроения тесно связано с разработкой материалов и новых технологий [1, 2]. Создание новых сплавов основано на учете особенностей их легирования, структурного и фазового состава [3, 4]. При разработке титановых сплавов нового поколения [5 – 8] одной из проблем является определение в них водорода, поскольку эксплуатационные свойства сплавов в значительной степени зависят от содержания этого элемента [9, 10]. Высокая диффузионная подвижность водорода [11] и возможность его направленной диффузии в поле напряжений или под влиянием градиента температуры могут быть причиной скопления водорода в некоторых участках и, вследствие этого, охрупчивания металла [12, 13]. Источниками повышенного содержания водорода могут быть также технологические операции, применяемые в процессе изготовления изделий, например, травление [14 – 17] или специальное наводороживание, используемое для пластифицирования некоторых сплавов [17 – 25]. Для выбора режимов термоводородной обработки и последующего вакуумного отжига следует контролировать содержание водорода на каждом этапе этих процессов. Разработка и исследования новых титановых сплавов связаны с необходимостью определения низких и высоких содер-

жаний водорода, а также его распределения в некоторых ограниченных участках металла.

В последнее время большое значение придается состоянию и химическому составу поверхностных слоев металла [17, 18], поэтому особый интерес представляют сведения о содержании водорода в металле, которые могут быть получены эмиссионным спектральным методом [26 – 28], поскольку пробы для анализа отбирают с наружных частей образца. Для эмиссионного спектрального анализа необходимо наличие стандартных образцов [29 – 31], диапазон содержаний водорода в которых должен обеспечивать возможность решения аналитических задач, возникающих при проведении различных процессов обработки титановых сплавов. Поэтому следует уточнить уровень возможных содержаний водорода в металле.

В работе [32] были исследованы образцы, содержащие 0,1 % масс. водорода. Такое же количество водорода было обнаружено в поверхностном слое металла после травления, а также при нагреве во влажной атмосфере [16]. В работах, посвященных водородной обработке сплавов, приводятся содержания водорода от 0,1 до 1,4 % масс. [17 – 25].

В стандартных образцах, ранее выпущенных различными организациями и исследователями, были представлены содержания 0,08 [27], 0,1 [26] и 0,15 % масс. [28]. Однако образцы ранних выпусков давно израсходованы. Наибольшее содержание водо-

¹ ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», Москва, Россия;
e-mail: letovaf@viam.ru

рода в стандартных образцах последних выпусков составляло 0,05 [33] и 0,022 % масс. [34], что не соответствует новым пределам определения. Поэтому необходимо было создать комплект стандартных образцов с более высоким содержанием водорода, при этом максимальное содержание должно составлять не менее 0,5 % масс. В связи с этим планировалось изготовление комплекта стандартных образцов категории СОП, содержащих от 0,04 до 0,5 % масс.

В качестве исходного материала СО был выбран сплав ВТ22, содержащий значительное количество β -фазы, присутствие которой способствует наводороживанию металла [10].

Цилиндры диаметром 12 мм и длиной 100 мм в количестве 10 штук устанавливали на специальную двухъярусную подставку, которой каждый образец касался только в четырех точках, что создавало возможность взаимодействия металла с окружающей средой. Подставку с образцами помещали в зону равномерного температурного поля водородной печи и нагревали при 1200 °С в течение различного времени. После насыщения водородом с металла снимали поверхностный слой толщиной приблизительно 0,3 мм, затем образцы подвергали длительному гомогенизирующему отжигу в запаянных кварцевых ампулах, помещенных в воздушную печь при температуре 820 °С в течение 60 ч. Для контроля правильности выбора зоны нагрева и первичного анализа материала СО отбирали два прутка (из десяти штук каждой партии, помещаемой в печь), которые анализировали с обоих торцов методом вакуум-нагрева при 900 °С, поскольку при указанной температуре в вакууме происходит почти полное удаление водорода из металла [35, 36]. Результаты анализа приведены в табл. 1. Как видно, условия насыщения материала СО были благоприятными и в образцах разных партий наблюдается различное содержание водорода, что в дальнейшем позволило провести градуировку спектральной аппаратуры. Образцы № 10 и 11 (изготовлены в единичных экземплярах) были насыщены водородом при химическом травлении и затем тоже подвергнуты гомогенизирующему отжигу [17].

Для использования полученного материала в качестве стандартных образцов необходимо исследовать

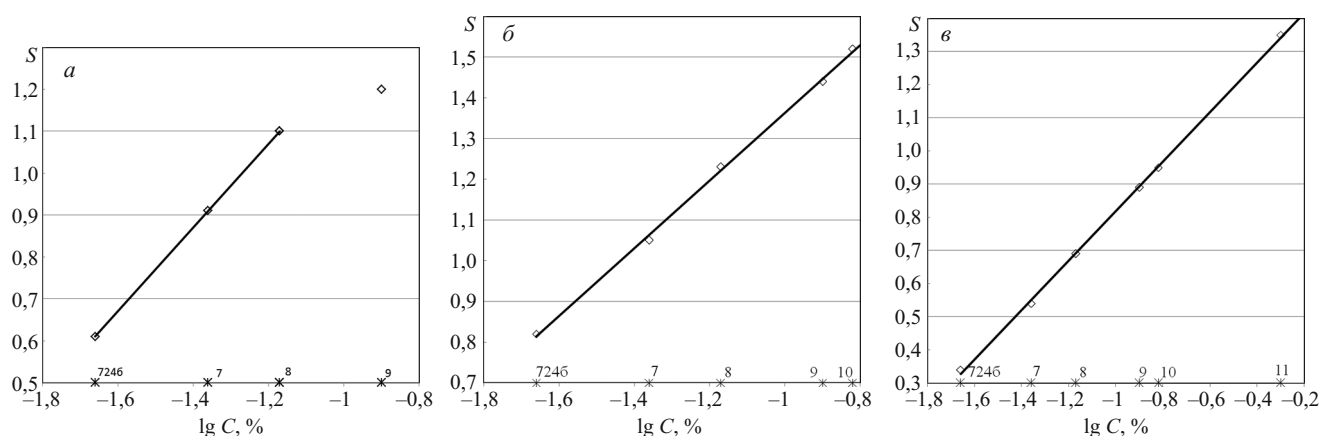
однородность распределения водорода в металле, для чего целесообразно применить спектральный метод.

Определение водорода спектральным методом обычно выполняется в соответствии с установленными методическими условиями. Рекомендации, предложенные в отраслевом стандарте [37], позволяют определять только до 0,06 % масс. водорода и не обеспечивают возможности анализа в диапазоне содержаний, охватывающем более двух порядков величины (от 0,002 до 0,5 % масс.). В литературе нет сведений об определении десятых долей процента водорода. В 60–70-х годах прошлого столетия много работ было посвящено повышению чувствительности определения тысячных долей процента водорода в титановых сплавах, поскольку технологи стремились к получению металла, свободного от газовых примесей. В настоящее время с появлением новых технологий термоводородной обработки титановых сплавов необходимо скорректировать методические условия для определения высоких содержаний водорода.

В работе использовали установки, включающие спектрографы ИСП-51, с применением разных способов регистрации спектра. Спектр возбуждали с помощью низковольтного импульсного генератора, параметры разрядного контура которого можно было изменять в широких пределах: зарядную емкость — от 80 до 2400 мкФ, индуктивность — от 30 до 200 мкГн, зарядное напряжение — от 100 до 250 В, омическое сопротивление — не более 0,4 Ом. Импульсный разряд можно получить двумя способами: при подведении пробы к жестко установленному противозлектроду до пробойного расстояния [38] или инициировании вспышки высокочастотной искрой. Спектр регистрировали фотографическим способом на аэрофотопленке «изопанхром» чувствительностью 1000–1300 ед. или с помощью фотоэлектронной кассеты (производства фирмы «МОПС»), оснащенной ПЗС и компьютером [39]. В качестве аналитической использовали линию водорода с длиной волны 656,2 нм, для измерения плотности почернения применяли микрофотометр МФ-2. Количество измерений выбирали в соответствии с задачами анализа. Анализировали ма-

Таблица 1. Результаты определения водорода в материале стандартных образцов

Номер образца	Метод вакуум-нагрева			Эмиссионный спектральный метод		
	Место отбора пробы	Результаты анализа, % масс.	Среднее арифметическое	Характеристика однородности стандартных образцов, % масс.	Аттестованное содержание водорода, % масс.	Погрешность аттестованного значения, % масс. ($n = 12$; $P = 0,95$)
7	1-й образец	0,043; 0, 046	0,044	0,003	0,044	±0,006
	2-й образец	0,047; 0, 041				
8	1-й образец	0,070; 0, 067	0,068	0,004	0,068	±0,008
	2-й образец	0,066; 0, 071				
9	1-й образец	0,120; 0, 131	0,126	0,0055	0,126	±0,012
	2-й образец	0,125; 0, 127				
10	—	—	0,200	0,007	0,200	±0,017
11	—	—	0,500	0,012	0,500	±0,028



Градуировочные графики для определения водорода в диапазоне содержаний 0,02 – 0,07 (а); 0,02 – 0,15 (б); 0,02 – 0,5 % масс. (в) (* — номера стандартных образцов)

териал, подготовленный для стандартных образцов описанным выше образом.

В ходе экспериментов с фотографической регистрацией спектра (в области нормальных почернений) было обнаружено, что при режимах генератора, рекомендованных ОСТом, в диапазоне высоких содержаний водорода от 0,06 до 0,5 % масс. наблюдается загиб градуировочных графиков. При работе с фотоэлектронной кассетой для содержаний выше 0,03 % масс. результаты измерений интенсивности аналитической линии оказываются также непропорциональными изменению содержания водорода. Причиной этого является влияние самопоглощения [40] излучения водорода вследствие значительного его количества, поступающего в разрядное облако. Для уменьшения влияния самопоглощения и получения прямолинейной зависимости интенсивности линии водорода от его содержания в пробе следует уменьшить поступление металла, экстрагируемого импульсным разрядом. Этого можно достичь различными способами, например, с помощью уменьшения энергии разряда и изменения параметров разрядного контура генератора. Для уменьшения длительности разряда следует снизить индуктивность разрядного контура генератора. Чтобы уменьшить экстракцию металла, можно также изменить угол заточки противоэлектрода [41].

На рисунке, а приведен градуировочный график, полученный при использовании медных противоэлектродов, заточенных на угол 80° (вместо 50° по ОСТ), и при меньших значениях параметров разрядного контура генератора (емкость — 160 мкФ, индуктивность — 30 мкГн, зарядное напряжение — 200 В). Диаметр эрозионного пятна в этом режиме составляет 1,0 мм, глубина — 50 мкм, т.е. меньше, чем в режиме 2 по ОСТ (1,2 – 1,5 мм). Как видно из рисунка, диапазон линейности не превышает 0,07 % масс. Очевидно, необходимо еще уменьшить эрозию пробы импульсным разрядом. Для этого применили противоэлектрод из алюминиевого сплава при заточке его вершины на тупой угол (110°) и изменили параметры разрядного контура генератора (емкость — 80 мкФ, индуктив-

ность — 30 мкГн, напряжение — 200 В). Диаметры эрозионных пятен — следов разряда в этом режиме составляли 0,8 – 0,9 мм, глубина лунки — 40 – 50 мкм. График, полученный в новых условиях (рисунок, б), линейен только до 0,12 % масс., поэтому эксперименты были продолжены.

Наилучшим оказалось сочетание вольфрамового электрода и следующих параметров разрядного контура: емкость — 400 мкФ, индуктивность — 30 мкГн, напряжение — 180 – 200 В. В этих условиях диапазон линейности градуировочного графика составляет 0,02 – 0,5 % масс. (рисунок, в), диаметр следа импульсного разряда на металле — 0,5 – 0,7 мм, глубина — 30 – 50 мкм в зависимости от выбранного напряжения. Угол при вершине электрода 30° был выбран с учетом результатов многих экспериментов. Вольфрамовый противоэлектрод оплавляется импульсным разрядом значительно меньше, чем медные и алюминиевые электроды. При остром угле заточки электрода уменьшается и перенос материала проб [43, 44], поэтому такой противоэлектрод можно использовать многократно [45]. Если разряд осуществляется с помощью приближения пробы к электроду, то можно выполнить 8 – 10 импульсов. Для увеличения количества разрядов без смены электрода необходимо увеличить межэлектродный промежуток и инициировать разряд высокочастотной искрой. В этом случае при высоких содержаниях водорода можно произвести 120 – 150 вспышек. Важно отметить, что с вольфрамовым электродом форма и размеры следов разрядов воспроизводятся значительно лучше, чем с медными и алюминиевыми, поэтому и погрешность результатов анализа существенно ниже. Если при фотографической регистрации спектра относительное СКО составляет 0,17 – 0,20, то при регистрации с помощью электронной кассеты оно уменьшается до 0,05 – 0,03 (табл. 2).

Найденные методические условия были использованы для исследования однородности материала, подготовленного для стандартных образцов в соответствии с рекомендациями ГОСТ 8.531–2002 [46], по со-

держанию и распределению водорода. Каждую партию образцов (материала СО) исследовали по следующей схеме. Отбирали четыре прутка, два из которых анализировали с каждого торца не менее 6–7 раз по всей аналитической площади, у поверхности прутка и в центре. Затем эти поверхности затачивали до удаления пятен — следов разрядов, т.е. на глубину не менее 100 мкм, и повторно анализировали таким же образом. Два других прутка разрезали посередине и, кроме торцов, анализировали образовавшиеся поверхности. Полученные характеристики однородности материала по содержанию водорода приведены в табл. 1. Затем были установлены аттестованные значения содержания водорода в образцах и погрешности аттестованных значений в соответствии с рекомендациями указанного ГОСТ и РМГ 53–2002 [47] (см. табл. 1). Полученные значения не превосходят погрешностей, которые допустимы для соответствующих содержаний при анализе металла методом вакуумной экстракции по ГОСТ 24956 [48] (см. табл. 2, где приведены показатели точности двух методов). Как видно из результатов исследования, материал СО можно считать достаточно однородным и аттестовать по категории СОП. Для подтверждения возможности использования новых СО выбрали пробы с известными высокими содержаниями водорода. Сравнение результатов спектрального анализа с полученными методом вакуум-нагрева (табл. 3), показывает, что расхождение результатов двух методов в соответствии с ГОСТ 24956 статистически незначимо. Это свидетельствует о пригодности стандартных образцов и выбранных методических условий для определения высоких содержаний водорода в титановых сплавах.

Следует отметить, что для определения высоких содержаний водорода спектральным методом необходимо уменьшить объем пробы, используемой при ана-

лизе. Из результатов экспериментов видно, что наряду с параметрами разрядного контура большое значение имеет материал противоэлектродов. Варианты разработанных методических условий могут быть выбраны в соответствии с задачами анализа, наличием материалов и возможностями аппаратуры. Применение медных и алюминиевых электродов позволяет получить результат опыта «более чистый» от постороннего водорода, так как противоэлектрод используют один раз после заточки. Условия, включающие вольфрамовый электрод, обеспечивают более высокую экспрессность анализа и меньшую погрешность результатов, однако перенос материала предыдущего образца может влиять на результат анализа последующего. В этом случае противоэлектроды могут быть «очищены» проведением дополнительных (1–3) импульсов на металле с низким содержанием водорода. Кроме того, при уменьшенном эрозионном воздействии импульсного разряда на металл можно получить ценную информацию о распределении водорода в зонах, подверженных действию различных факторов (деформации, длительному пребыванию в напряженном состоянии, поверхностному наводороживанию и др.).

Таким образом, для определения 0,04–0,5 % масс. водорода изготовлены стандартные образцы категории СОП с градацией содержания водорода. С целью расширения диапазона линейности градуировочного графика в область более высоких содержаний водорода и уменьшения влияния самопоглощения изучены различные способы сокращения объема пробы, поступающего в разрядное облако: снижение энергии разряда, применение других материалов противоэлектродов и изменение угла их заточки.

Разработаны методические условия определения водорода в титановых сплавах в диапазоне содержаний 0,02–0,5 % масс. Изготовленные стандартные

Таблица 2. Показатели точности различных методик определения водорода

Метод определения	Диапазон определяемых содержаний, % масс.	Границы относительной погрешности, % ($P = 0,95$)	Повторяемость, % ($n = 5, P = 0,95$)
Метод вакуум-нагрева (по ГОСТ 25956)	0,02 – 0,05	15	—
Спектральный	0,02 – 0,12	5	3
эмиссионный метод	0,12 – 0,50	4 – 3	3

Таблица 3. Результаты определения водорода в образцах титановых сплавов различными методами

Номер образца	Марка сплава	Спектральный метод		Метод вакуум-нагрева	
		Содержание водорода, % масс.	Погрешность, % масс. ($n = 3,4, P = 0,95$)	Содержание водорода, % масс.	Допустимая погрешность, % масс. ($n = 3,4, P = 0,95$)
1	BT 1-1	0,0700	$\pm 0,0035$	0,070	$\pm 0,010$
2	BT 22	0,1250	$\pm 0,0050$	0,130	$\pm 0,020$
3	BT 22	0,0850	$\pm 0,0045$	0,090	$\pm 0,008$
4	BT 30	0,0300	$\pm 0,0015$	0,027	$\pm 0,005$
5	BT 14	0,0260	$\pm 0,0015$	0,025	$\pm 0,005$
6	BT 30	0,0450	$\pm 0,0022$	0,043	$\pm 0,006$
7	BT 30	0,0200	$\pm 0,0010$	0,022	$\pm 0,005$
8	BT 22	0,1800	$\pm 0,0060$	0,175	$\pm 0,026$

образцы и новые методические условия использованы для анализа образцов, имеющих известные и различные содержания водорода, получено хорошее соответствие результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Стратегические направления развития материалов / *Авиационные материалы и технологии*. 2012. Специальный выпуск. С. 7 – 17.
2. Каблов Е. Н. ВИАМ — направление главного удара / *Наука и жизнь*. 2012. № 6. С. 14 – 18.
3. Антипов В. В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов / *Авиационные материалы и технологии*. 2012. Специальный выпуск. С. 157 – 167.
4. Ночовная Н. А., Иванов В. И., Алексеев Е. Б., Кочетков А. С. Пути оптимизации эксплуатационных свойств сплавов на основе интерметаллидов титана / *Авиационные материалы и технологии*. 2012. Специальный выпуск. С. 196 – 206.
5. Пат. 2405849 РФ. Интерметаллидный сплав на основе титана / Каблов Е. Н., Иванов В. И., Ночовная Н. А., Савельев Ю. Г. Опубл. 28.10.2009.
6. Орлов М. Р. Стратегические направления развития испытательного центра ФГУП «ВИАМ» / *Авиационные материалы и технологии*. 2012. Специальный выпуск. С. 387 – 393.
7. Проходцева Л. В., Филонова Е. В., Наприенко С. А., Моисеева Н. С. Исследование закономерностей развития процессов разрушения при циклическом нагружении сплава ВТ-41 / *Авиационные материалы и технологии*. 2012. Специальный выпуск. С. 407 – 412.
8. Хорев А. И., Ночовная Н. А., Яковлев А. Л. Микролегирование редкоземельными металлами титановых сплавов / *Авиационные материалы и технологии*. 2012. Специальный выпуск. С. 206 – 212.
9. Якимова А. М. Влияние водорода и кислорода на свойства и структуру титановых сплавов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 1960. — 23 с.
10. Колачев Б. А. Водородная хрупкость цветных металлов. — М.: Металлургия, 1966. — 256 с.
11. Мороз Л. С., Чечулин Б. Б. Водородная хрупкость металлов. — М.: Металлургия, 1967. С. 140 – 141.
12. Гуревич С. М. К вопросу о влиянии водорода на склонность к трещинам и механические свойства сварных соединений титана / *Автоматическая сварка*. 1957. № 1. С. 8 – 13.
13. Михайлов А. С., Крылов Б. С. Склонность сварных соединений из титановых сплавов к замедленному растрескиванию / *МиТОМ*. 1962. № 4. С. 48 – 53.
14. Каганович И. Н., Шихалеева Т. В. Наводороживание титановых сплавов при травлении / *МиТОМ*. 1963. № 3. С. 39 – 40.
15. Пивоварова Л. Н., Батраков В. П. Химическая обработка поверхности титановых сплавов. — В кн.: *Легкие сплавы в народном хозяйстве*. — М.: ОНТИ, 1975. С. 125 – 130.
16. Кокнаев Р. Г., Локшин Ф. Л. Влияние травления на параметры решетки сплава ВТ15 / *Технология легких сплавов*. 1969. № 2. С. 64 – 67.
17. Фишгойт А. В., Иванова Т. В. Определение коэффициента диффузии водорода в сплавах титана с использованием закономерностей абсорбции водорода при химическом травлении. — В сб. докл. II Международной конференции «Водородная обработка материалов». — Донецк: Инженерная академия Украины. Донецкий инженерно-физический институт, 1998. С. 67.
18. Ильин А. А., Колачев Б. А., Носова В. К. Достижения и перспективы водородной технологии производства и обработки титановых сплавов. — В сб. докл. II Международной конференции «Водородная обработка материалов». — Донецк: Инженерная академия Украины. Донецкий инженерно-физический институт, 1998. С. 31.
19. Ильин А. А., Скворцова С. В., Клубова Е. В., Зеленина Т. В. Исследование влияния водорода на формирование структуры в альфа-титановых сплавах. — В сб. докл. II Международной конференции «Водородная обработка материалов». — Донецк: Инженерная академия Украины. Донецкий инженерно-физический институт, 1998. С. 87.
20. Ильин А. А., Коллеров М. Ю., Осинцева Н. О. Формирование фазового состава и структуры в сплавах системы титан – ванадий – водород при термической обработке. — В сб. докл. II Международной конференции «Водородная обработка материалов». — Донецк: Инженерная академия Украины. Донецкий инженерно-физический институт, 1998. С. 88.
21. Мамонов А. М., Кусакина Ю. Н., Кононенко Н. В. Влияние водорода на кинетику упорядочения в жаропрочном титановом сплаве с интерметаллидным упрочнением. — В сб. докл. II Международной конференции «Водородная обработка материалов». — Донецк: Инженерная академия Украины. Донецкий инженерно-физический институт, 1998. С. 97.
22. Ильин А. А., Скворцова С. В., Шиббер И. А., Фенина И. В. Фазовые и структурные превращения в титановом сплаве ТС6 под действием водорода. — В сб. докл. II Международной конференции «Водородная обработка материалов». — Донецк: Инженерная академия Украины. Донецкий инженерно-физический институт, 1998. С. 99.
23. Афонин В. Е., Овчинников А. В. Исследование закономерностей деформации бета-фазы титанового сплава ВТ1-0, легированного водородом. — В сб. докл. II Международной конференции «Водородная обработка материалов». — Донецк: Инженерная академия Украины. Донецкий инженерно-физический институт, 1998. С. 101.
24. Овчинников А. В., Носов В. К. Водородное пластифицирование титановых сплавов ВТ20 и ВТ25У в интервале температур 350 – 700 °С. — В сб. докл. II Международной конференции «Водородная обработка материалов». — Донецк: Инженерная академия Украины. Донецкий инженерно-физический институт, 1998. С. 103.
25. Егорова Ю. Б., Талалаев В. Д. Оценка оптимальных режимов механоводородной обработки титановых сплавов. — В сб. докл. II Международной конференции «Водородная обработка материалов». — Донецк: Инженерная академия Украины. Донецкий инженерно-физический институт, 1998. С. 106.
26. Свентицкий Н. С., Сухенко К. А., Галлонов П. П. и др. Спектральный анализ титана и его сплавов на азот, водород и кислород / *Заводская лаборатория*. 1956. Т. 22. № 6. С. 668 – 673.
27. Боровский И. Б., Скотников С. А. Аппаратура и методика спектрального определения водорода в титане. — В кн.: *Титан и его сплавы*. Вып. 2. Металлургия титана. — М.: АН СССР, 1969. С. 165 – 173.
28. Буянов Н. В., Вашков О. И., Гаврилова В. К., Коротков В. Ф. Спектральное определение водорода в титане. — В кн.: *Титан и его сплавы*. Вып. 2. Металлургия титана. — М.: АН СССР, 1969. С. 174 – 178.
29. Карпов Ю. А. Спектральный анализ в аналитическом контроле металлургического производства / *Стандартные образцы*. 2012. № 1. С. 3 – 6.
30. Каблов Е. Н., Морозов Г. А., Крутиков В. Н., Муравская Н. П. Аттестация стандартных образцов состава сложнотитановых сплавов с применением эталона / *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 2. С. 9 – 11.
31. Летов А. Ф., Карачевцев Ф. Н., Гундобин Н. В., Титов В. И. Разработка стандартных образцов состава сплавов авиационного назначения / *Авиационные материалы и технологии*. 2012. Специальный выпуск. С. 393 – 398.

32. **Якимов А. М.** Взаимодействие титана с водородом. — В сб.: Анализ газов в металлах. Труды по аналитической химии. — М.: Изд. АН СССР, 1960. С. 142.
33. **Сухенко К. А., Григорова В. С., Линдстрем И. С.** Об определении газовых примесей в тугоплавких металлах и сплавах спектральным методом. В кн.: Методы определения и исследования состояния газов в металлах. — М.: Наука. 1968. С. 142.
34. **Матюгина И. В., Плинер Ю. Л., Усов В. Н.** Стандартные образцы для спектрального определения водорода в титановых сплавах / Журн. прикладной спектроскопии. 1972. Т. 17. № 1. С. 13 – 15.
35. **Галактионова Н. А.** Водород в металлах. — М.: Metallurgia, 1967. С. 113, 120.
36. **Туровцева З. М., Кунин Л. Л.** Анализ газов в металлах. — М.-Л.: Изд. АН СССР, 1959. С. 27, 53.
37. ОСТ 1.90034–81. Сплавы титановые. Метод спектрального определения содержания водорода. — 14 с.
38. **Исаев Н. Г.** Усовершенствование спектрального метода определения водорода в титановых сплавах / Заводская лаборатория. 1960. Т. 26. № 5. С. 577.
39. **Григорьев Л. И., Силькис Э. Г.** Применение фотоэлектронной кассеты ООО «Морс» для определения водорода в титане. — В сб. материалов XI Всероссийского семинара по спектральному анализу промышленных материалов и объектов экологии. — СПб.: Аналитика. 2003. С. 9.
40. **Зайдель А. Н., Калитеевский Н. И., Липис Л. В., Чайка М. П.** Эмиссионный спектральный анализ атомных материалов. — М.-Л.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. С. 199 – 200.
41. **Барашева Т. В., Давыдов Д. М., Летов А. Ф., Тишин И. Г.** О возможности уменьшения глубины слоя исследуемого материала при определении содержания водорода в титановых сплавах / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т. 80. № 2. С. 18 – 21.
42. **Таганов К. И.** Некоторые исследования по переносу вещества в разряде при спектральном анализе / Доклады АН СССР. Серия Физическая. 1950. Т. 14. № 5. С. 634 – 635.
43. **Мальцев М. Г.** Исследование некоторых закономерностей контактно-искрового переноса вещества. — В сб.: Методы эмиссионного локального и микроспектрального анализа. Ч. II. — Л.: ЛДНТП, 1964. С. 37 – 53.
44. **Барашева Т. В., Давыдов Д. М., Тишин И. Г.** Об усовершенствовании спектрального эмиссионного метода определения водорода в титановых сплавах. — В сб. материалов Всероссийской конференции по аналитической спектроскопии. — Краснодар, 2012. С. 109.
45. ГОСТ 8.531–2002. Стандартные образцы состава монолитных и дисперсных материалов. Способы оценивания однородности. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002.
46. РМГ 53–2002. Стандартные образцы. Оценивание метрологических характеристик с использованием эталонов и образцовых средств измерения. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001.
47. ГОСТ 24956–81. Титан и сплавы титановые. Метод определения водорода. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 1997. — 14 с.