

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-2-II-57-64>

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХРОМА, ВАНАДИЯ, МЕДИ, НИКЕЛЯ, МАРГАНЦА В СТАЛЯХ И ЧУГУНАХ МЕТОДОМ АТОМНО-АБСОРБЦИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ С АТОМИЗАЦИЕЙ В ПЛАМЕНИ

© **Вера Владимировна Марочкина***, **Елена Ивановна Бueva**,
Елена Сергеевна Кулагина

ЗАО «Институт стандартных образцов» (ЗАО «ИСО»), Россия, 620057, г. Екатеринбург, Ульяновская ул., д. 13-а, литер А; *e-mail: analitik@icrm-ekb.ru

*Статья поступила 5 декабря 2022 г. Поступила после доработки 16 декабря 2022 г.
Принята к публикации 28 декабря 2022 г.*

Проведен сравнительный анализ стандартизованных методик определения ряда элементов в легированных и нелегированных сталях и чугунах (ванадий — ГОСТ 12351–2003, ГОСТ 22536.12–88, ГОСТ 2604.7–84; хром — ГОСТ 12350–78, ГОСТ 22536.7–88, ГОСТ 2604.6–77; медь — ГОСТ 22536.8–87, ГОСТ 12355–78, ГОСТ 2604.9–83, ГОСТ Р ИСО 4943–2010; марганец — ГОСТ 12348–78, ГОСТ 22536.5–87, ГОСТ 2604. 5–84; никель — ГОСТ 12352 – 81, ГОСТ 22536.9–88, ГОСТ 2604.8–77, ГОСТ Р ИСО 4940–2010) методом атомно-абсорбционной спектроскопии с атомизацией в пламени. На основе проведенного анализа показана возможность объединения рассмотренных межгосударственных стандартов в универсальные поэлементные методики для данных материалов. В аналитической лаборатории испытательного центра Института стандартных образцов соответствующие методики разработаны и аттестованы. При оптимальных условиях анализа предложенные методики обеспечивают расширение диапазона определяемых концентраций. Проведено сравнение разработанных методик определения ванадия, хрома, меди, марганца, никеля в сталях и чугунах с международными стандартами ASTM E350-18, ASTM E351-18, ASTM E352-18.

Ключевые слова: атомно-абсорбционная спектроскопия; стандартные образцы; сталь; чугун; хром; ванадий; медь; никель; марганец; атомизация в пламени.

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR THE DETERMINATION OF CHROMIUM, VANADIUM, COPPER, NICKEL, AND MANGANESE IN STEEL AND CAST IRON BY FLAME ATOMIC ABSORPTION SPECTROMETRY

© **Vera V. Marochkina***, **Elena I. Bueva**, **Elena S. Kulagina**

The institute for Certified Reference Materials (ICRM), 13-a, Ul'yanovskaya ul., Yekaterinburg, 620057, Russia;
*e-mail: analitik@icrm-ekb.ru

Received December 5, 2022. Revised December 16, 2022. Accepted December 28, 2022.

A comparative analysis of the methods used for determination of a number of elements in steels and cast irons by atomic absorption spectroscopy with flame atomization have been carried out (vanadium by GOST 12351–2003, GOST 22536.12–88, GOST 2604.7–84; chromium by GOST 12350–78, GOST 22536.7–88, GOST 2604.6–77; copper by GOST 22536.8–87, GOST 12355–78, GOST 2604.9–83, GOST 4943–2010; manganese by GOST 12348–78, GOST 22536.5–87, GOST 2604. 5–84; nickel by GOST 12352 – 81, GOST 22536.9–88, GOST 2604.8–77, GOST 4940–2010; in alloyed and unalloyed steels and alloyed and unalloyed cast irons). Analysis of the data obtained revealed the possibility of combining the considered Russian national standards into universal multi-element methods for the materials under study. The developed methods have been then certified in the analytical laboratory of the testing center of the Institute for certified reference materials (ICRM). The proposed methods provide an extension of the range of determined concentrations under optimal conditions of analysis. Comparison of the developed methods for the determination of vanadium, chromium, copper, manganese, nickel in steels and cast irons with international standards ASTM E350-18, ASTM E351-18, ASTM E352-18 have been carried out.

Keywords: atomic-absorption spectrometry; reference materials; steel; cast iron; chromium; vanadium; copper; nickel; manganese; flame atomization.

Введение

Использование современного оборудования и гибридных методов анализа наряду с упрощением анализа и увеличением его экспрессности, приводит к возрастающей точности определения элементов в исследуемых объектах. Многие межгосударственные стандарты на методики анализа сталей и чугунов, разработанные в прошлом веке, устарели как по форме, так и по содержанию. В ряде стандартов отсутствуют необходимые показатели точности и другие метрологические характеристики, которые требуются при практическом применении методики [1].

Метод атомно-абсорбционной спектроскопии с атомизацией в пламени (ПААС) широко используют в анализе сталей и чугунов благодаря высокой селективности определения элементов и простоте использования прибора. Действующие межгосударственные стандарты для определения хрома, ванадия, меди, никеля, марганца в сталях и чугуне представлены в табл. 1.

Существующие стандартизованные методики необходимо пересмотреть в связи с несоответствием современным требованиям. Цель настоящей работы заключалась в устранении выявленных несоответствий посредством разработки обновленных методик определения элементов в сталях и чугунах методом ПААС.

Экспериментальная часть

Для разработки и аттестации методик определения меди, марганца, никеля, хрома и ванадия в сталях и чугунах использовали атомно-абсорбционный спектрометр с атомизацией в пламени Solaar S4 (Thermo Fisher Scientific, США).

Реактивы для приготовления стандартных растворов меди, марганца, никеля, хрома и ванадия соответствовали квалификации, указанной в межгосударственных стандартах (см. табл. 1).

Обсуждение результатов

Определение хрома. В ГОСТ 2604.6–77 и ГОСТ 12350–78 метод ПААС отсутствует, ограничивая исследуемые материалы углеродистой сталью и нелегированным чугуном (ГОСТ 22536.7–88). В этом стандарте описана методика определения хрома методом ПААС, однако узкий диапазон определяемых концентраций (0,01–0,50 %) дополнительно ограничивает выбор объектов исследования.

Важным пунктом для применения данной методики является указание веществ, используемых для приготовления стандартного раствора. Известно, что межгосударственные стандарты и общие требования к ним не допускают изменения квалификации реактивов, концентрации стандартных растворов, и иных отступлений, если это необходимо, без их дополнительной верификации [19]. При использовании бихромата калия ($K_2Cr_2O_7$) в качестве исходного реактива для приготовления стандартного раствора в зависимости от его квалификации требуется стадия перекристаллизации перед высушиванием, которая отсутствует в ГОСТ 22536.7–88.

На рис. 1 представлены градуировочные зависимости для определения хрома, полученные по ГОСТ 22536.7–88 и построенные с использованием растворов сравнения, содержащих железо в качестве матрицы и проведенных через все стадии анализа. График ограничен областью линейности из справочных материалов [20]. Из рис. 1 видно отклонение градуировочного графика

Таблица 1. Межгосударственные стандарты на методы определения хрома, ванадия, марганца, меди, никеля в сталях и чугунах

Table 1. Interstate standards for methods for the determination of chromium, vanadium, manganese, copper, nickel in steels and cast irons

Определяемый элемент	Межгосударственный стандарт	Ссылка
Хром	ГОСТ 22536.7–88. Сталь углеродистая и чугун нелегированный. Методы определения хрома; ГОСТ 2604.6–77. Чугун легированный. Методы определения хрома; ГОСТ 12350–78. Стали легированные и высоколегированные. Методы определения хрома	[2 – 4]
Ванадий	ГОСТ 12351–2003. Стали легированные и высоколегированные; ГОСТ 22536.12–88. Сталь углеродистая и чугун нелегированный; ГОСТ 2604.7–84. Чугун легированный	[5 – 7]
Медь	ГОСТ 22536.8–87. Сталь углеродистая и чугун нелегированный; ГОСТ 12355–78. Стали легированные и высоколегированные; ГОСТ 2604.9–83. Чугун легированный; ГОСТ Р ИСО 4943–2010. Сталь и чугун	[8 – 11]
Никель	ГОСТ 12352–81. Стали легированные и высоколегированные; ГОСТ 22536.9–88. Сталь углеродистая и чугун нелегированный; ГОСТ 2604.8–77. Чугун легированный; ГОСТ Р ИСО 4940–2010. Сталь и чугун	[12 – 15]
Марганец	ГОСТ 12348–78. Стали легированные и высоколегированные; ГОСТ 22536.5–87. Сталь углеродистая и чугун нелегированный; ГОСТ 2604.5–84. Чугун легированный	[16 – 18]

ка, построенного по ГОСТ 22536.7–88, от линейности в области содержаний хрома свыше 800 мкг. Стоит также отметить влияние кислотности среды: углы наклона градуировочных графиков различны.

В соответствии с ГОСТ 22536.7–88 нерастворимый остаток, получаемый вследствие высокого содержания кремния и углерода при анализе высокоуглеродных сталей и чугунов, отбрасывают. Установлено, что в результате происходит систематическое занижение результата анализа, что при аттестации стандартных образцов недопустимо.

Указанные недостатки стандартизованной методики определения хрома в сталях и чугунах были учтены при создании НДИ 01.01.02.185–2019 «Сталь, чугун. Определение массовой доли хрома. Атомно-абсорбционный метод» [21]. Разработанная методика предусматривает использование в ходе анализа и для приготовления стандартного раствора не только реактивов заданной квалификации, но и дополнительно очищенных. Благодаря варьированию навесок и введению аликвотированию удалось расширить диапазон определяемых концентраций хрома до 10 % (0,01 – 10,0 %). Кроме того, указанные значения масс навесок и объемов аликвот являются рекомендуемыми и могут быть изменены при необходимости.

Для разложения пробы в представленной НДИ 01.01.02.185–2019 предложено три различных способа в зависимости от состава исследуемого образца. Потерь при разложении пробы помогает избежать также введенная операция доплавления.

Установлено, что градуировочный график, построенный с учетом кислотности среды и влияния матрицы, имеет область линейности до 500 мкг.

Определение ванадия. Метод ПААС для определения ванадия в сталях и чугунах является наиболее экспрессным из представленных в соответствующих межгосударственных стандартах, однако присутствует только в ГОСТ 12351–2003. Таким образом, вводится ограничение на возможное определение ванадия в составе чугуна легированного/нелегированного, которое можно снять введением дополнительной операции доплавления. Данный этап необходим для перевода ванадия, сорбированного присутствующим кремнием, в раствор.

Немаловажным пунктом при выборе той или иной методики является наличие в лаборатории реактивов для приготовления стандартного раствора. В ГОСТ 12351–2003 используется металлический ванадий либо метаванадат аммония (NH_4VO_3). В настоящее время в дополнение к этому списку желательно добавить оксид вана-

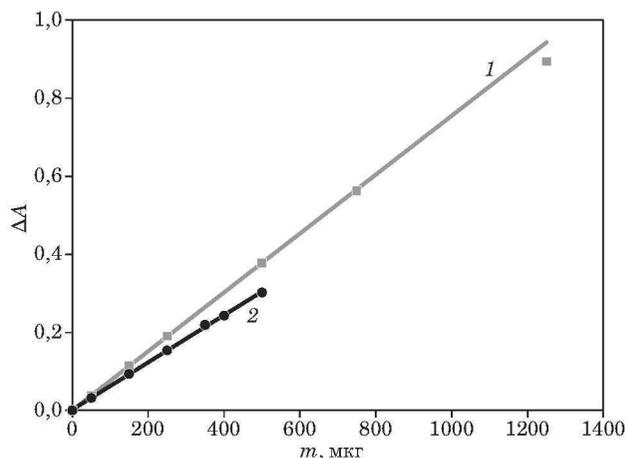


Рис. 1. Градуировочные зависимости для определения хрома, построенные по ГОСТ 22536.7–88 (1) и предложенной методике НДИ 01.01.02.185–2019 (2)

Fig. 1. Calibration curves for chromium determination plotted using interstate standard GOST 22536.7–88 (1) and developed method NDI 01.01.02.185–2019 (2)

дия (V) в связи с дороговизной металлического ванадия высокой чистоты и сложностью использования раствора метаванадата аммония, относящегося к классу соединений повышенной опасности и требующего установления концентрации гравиметрическим или титриметрическим методом [22].

Стоит отметить, что в ГОСТ 12351–2003 градуировочный график соответствует известной области линейности [20], в отличие от рассмотренного выше случая определения хрома по ГОСТ 22536.7–88. Кроме того, приготовленные растворы сравнения для построения градуировочной зависимости проводят через все стадии анализа с введенным железом для учета его влияния и выравнивания кислотности среды. Однако в качестве первой точки градуировочной зависимости при необходимости можно использовать точки ниже 200 мкг (рис. 2).

Учитывая высказанные замечания, разработана и аттестована методика НДИ 01.01.02.181–2019 «Сталь, чугун. Определение массовой доли ванадия. Атомно-абсорбционный метод» [23]. Достоинством данной методики является не только расширение круга объектов анализа за счет включения в него легированного/нелегированного чугуна и углеродистой стали, но и увеличение диапазона определяемых концентраций. Подобраны оптимальные навески и разбавление, позволяющие определять ванадий в диапазоне 0,005 – 3,0 % (ГОСТ 12351–2003 имеет диапазон определения 0,005 – 1,0 %).

Введенные примечания позволяют варьировать указанные навески, разбавление, ква-

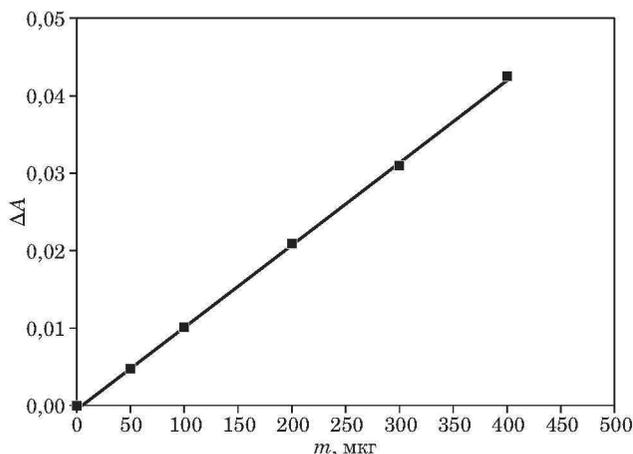


Рис. 2. Градуировочная зависимость для определения ванадия, построенная по НДИ 01.01.02.181–2019

Fig. 2. Calibration curve for vanadium determination plotted according to NDI 01.01.02.181–2019 procedure

лификацию реактивов, поскольку эти значения являются рекомендуемыми.

Определение меди, марганца, никеля. Действующие в настоящее время межгосударственные стандарты для определения меди, никеля, марганца в сталях и чугунах методом ПААС перечислены в табл. 1. Основные недочеты стандартизованных методик, требующие исправления, аналогичны представленным ранее при анализе соответствующих стандартов для определения хрома и ванадия в стали и чугуне. Так, в стандартах [8 – 10, 12 – 14, 16 – 18] нерастворимый осадок отбрасывают, хотя он может содержать малые количества определяемых компонентов. Выгодно отличаются более свежие стандарты — ГОСТ Р ИСО 4940–2010 [15], ГОСТ Р ИСО 4943–2010 [11]: присутствие хлорной кислоты при растворении образца обеспечивает более полное разложение пробы.

Градуировочные зависимости для определения марганца, меди и никеля в сталях и чугунах, построенные в соответствии с действующими стандартами, представлены на рис. 3.

В справочных данных указано, что линейный вид зависимости оптической плотности от концентрации соблюдается до 300 мкг/100 см³ для марганца, до 500 мкг/100 см³ — в случае меди и никеля [20]. Из рис. 3 видно отклонение от линейности после 500 мкг в случае меди, 300 мкг — в случае марганца, 500 мкг — для никеля (длина волны 232,0 нм). Стоит также отметить, что практически все действующие межгосударственные стандарты не учитывают влияние железа на аналитический сигнал при определении марганца, меди и никеля. Исключение составляют ГОСТ Р ИСО 4943–2010 (для меди), ГОСТ 22536.9–88, ГОСТ Р ИСО 4940–2010 (для нике-

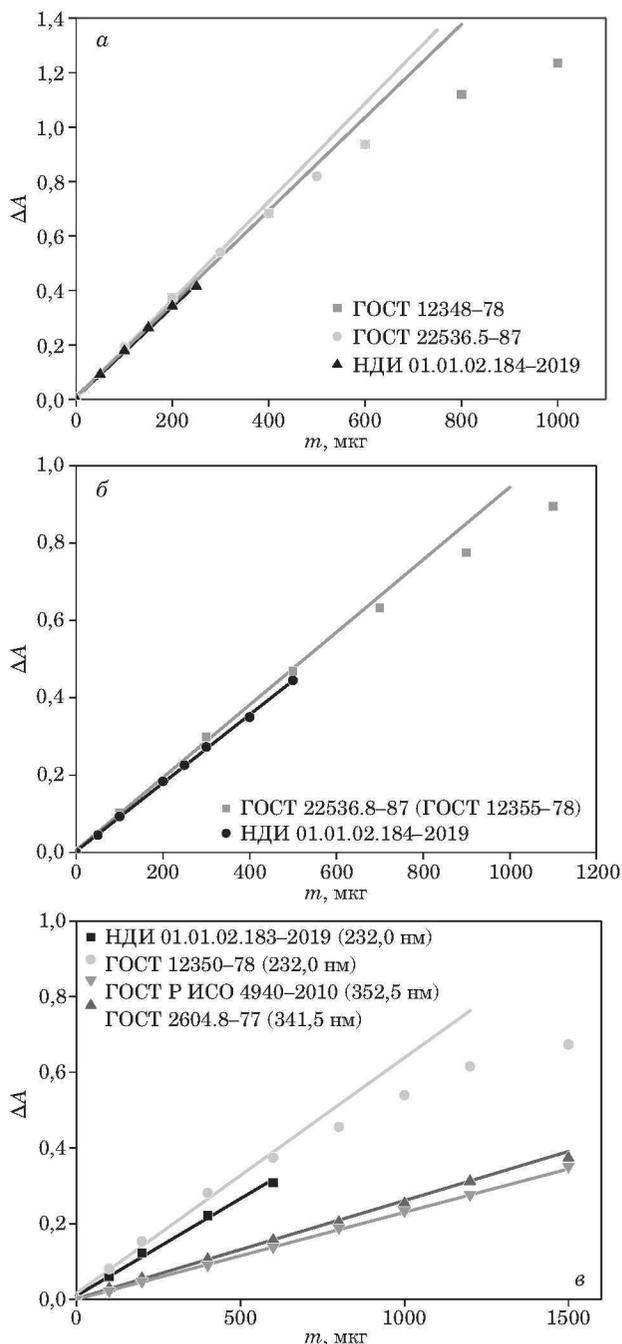


Рис. 3. Градуировочные зависимости для определения марганца (а), меди (б) и никеля (в), построенные в соответствии с различными методиками

Fig. 3. Calibration curves for the determination of manganese (a), copper (b), and nickel (c) plotted using different methods

ля), однако на рис. 3, б, в заметно подавление аналитического сигнала.

Поскольку процедуры разложения пробы для определения марганца и меди идентичны, была разработана объединенная методика НДИ 01.01.02.184–2019 «Сталь, чугун. Определение массовой доли марганца и меди. Атомно-абсорб-

ционный метод» [24]. К достоинствам данного метода можно отнести расширенный диапазон определяемых концентраций, который составляет 0,005 – 2,0 % для меди и 0,01 – 5,0 % для марганца (рабочий диапазон межгосударственного стандарта начинается с 0,1 %). Более низкие содержания меди в сталях и чугунах можно определять только используя ГОСТ Р ИСО 4943–2010, однако указанный стандарт имеет более узкий интервал определяемых концентраций (0,004 – 0,5 %).

При разработке методики НДИ 01.01.02.183–2019 «Сталь, чугун. Определение массовой доли никеля. Атомно-абсорбционный метод» [25] установлено, что, кроме железа, основным мешающим компонентом для определения никеля является марганец при соотношении содержаний Ni:Mn менее 1:8, что особенно проявляется при содержании никеля меньше 0,1 %. Предложено отделять никель от марганца соосаждением с гидроксидом железа. Такое низкое содержание никеля определяют по ГОСТ 22536.9–88 и ГОСТ Р ИСО 4940–2010 (0,02 – 0,5 и 0,002 – 0,5 % соответственно), не учитывающим указанного влияния.

В разработанной методике НДИ 01.01.02.183–2019 отсутствует дробление по классификации материала, выбор способа разложения зависит от состава пробы. Методика обладает широким диапазоном определяемых концентраций благодаря подобранному соотношению навесок и аликвотирования (0,005 – 10,0 %). Более высокой границей диапазона обладают ГОСТ 12352 – 81 (стали легированные и высоколегированные) и ГОСТ 2604.8–77 (чугун легированный), позволяющие определять до 15 % никеля.

Для проведения анализа в НДИ 01.01.02.183–2019 предложено использовать аналитическую линию 232,0 нм, для которой чувствительность определения выше по сравнению с альтернативными длинами волн 341,5 и 352,5 нм.

Определение хрома, ванадия, меди, марганца, никеля в сталях и чугунах методом ПААС по международным стандартам. Метод атомно-абсорбционной спектроскопии широко используется также и в международных стандартах. Для сравнения среди них были выбраны следующие: ASTM E350-18 (углеродистая сталь, низколегированная сталь, кремнистая электротехническая сталь, литое железо, ковкое железо), ASTM E351-18 (чугун), ASTM E352 – 18 (инструментальные стали, высоколегированные стали) [26 – 28].

Примечательно, что все интересующие элементы определяют данным методом только в ASTM E350-18, в то время как для анализа чугунов описаны только методики определения

хрома, ванадия и никеля (ASTM E351-18), а для анализа высоколегированных сталей — хрома и ванадия (ASTM E352 – 18). Краткая характеристика данных методов представлена в табл. 2.

Определение никеля в чугунах по ASTM E351-18 по существу является не только атомно-абсорбционным, поскольку для отделения мешающих элементов используют стадию сорбционного разделения на анионообменных смолах. В связи с этим характеристика методики отсутствует в табл. 2.

При анализе представленных международных стандартов возникают следующие вопросы.

1. В методиках определения хрома и меди нижняя точка диапазона определяемых концентраций при переходе к ААС определению лежит ниже первой точки градуировочного графика (60 мкг относительно 100 мкг стандарта для хрома, 20 мкг относительно 50 мкг стандарта для меди).

2. Градуировочные графики для определения хрома и марганца будут иметь такие же отклонения, как представленные на рис. 1 и 3, а соответственно, что вызывает вопросы к их области линейности. Данное обстоятельство особенно важно при аттестации стандартных образцов, когда изменение наклона градуировочной зависимости значительно влияет на результат определения элемента в анализируемом образце.

3. При отбрасывании нерастворимого остатка по методикам определения никеля, марганца, меди и ванадия возможны потери этих элементов, что скажется на итоговом результате.

Методика определения ванадия по ASTM E350-18, ASTM E351-18, ASTM E352-18 во многом совпадает с предложенной НДИ 01.01.02.181–2019, однако разработанная в нашем Институте методика расширяет диапазон определяемых концентраций, подходит для различных материалов (объединенных под номенклатурой сталь, чугун), а также предлагает альтернативные варианты разложения и реактивы для приготовления стандартного раствора ванадия.

Определение никеля по ASTM E350-18 рекомендуют проводить на длине волны 352,5 нм, с использованием которой анализ обладает меньшей чувствительностью по сравнению с $\lambda = 232,0$ нм. Достоинством данного стандарта является примечание о возможности использования другой длины волны при условии проверки линейности градуировочного графика и его валидации.

Заключение

В целом проведенный сравнительный анализ нормативных документов показал, что замеча-

Таблица 2. Краткая характеристика определения элементов методом ААС по международным стандартам**Table 2.** Brief description of methods for the determination of elements by the atomic absorption spectroscopy according to international standards

Определяемый элемент (стандарт)	Диапазон определяемых содержаний, %	Мешающие элементы	Стандартный раствор	Разложение	Градуировочный график	Спектральный буферный раствор	Длина волны, нм	Пламя
Хром (ASTM E350-18, ASTM E351-18, ASTM E352-18)	0,006 – 1,00	Железо подавляет аналитический сигнал	Бихромат калия ($K_2Cr_2O_7$)	Кислотное, присутствует стадия доплавления с K_2CO_3	Введение железа в количестве, эквивалентном количеству железа в пробе, кислотное разложение для соответствия кислотности растворов сравнения и пробы, область линейности 100 – 1500 мкг/см ³	Отсутствует	357,9	Закись азота – ацетилен
Ванадий (ASTM E350-18, ASTM E351-18, ASTM E352-18)	0,006 – 0,15	Железо подавляет аналитический сигнал, титан влияет при содержании более 0,5, вольфрам — более 1,0 %	Ванадий металлический, просушенный метаванадат аммония (NH_4VO_3)	Кислотное, в присутствии хлорной кислоты	Кислотное разложение для соответствия кислотного состава растворов сравнения и пробы, область линейности 200 – 1600 мкг/см ³	Хлорид алюминия ($AlCl_3$), 20 г/дм ³	318,4	Закись азота – ацетилен
Медь (ASTM E350-18)	0,004 – 0,5	Железо подавляет аналитический сигнал	Медь металлическая	Кислотное, в присутствии хлорной кислоты, остаток отбрасывают	Введение железа в количестве, эквивалентном количеству железа в пробе, кислотное разложение для соответствия кислотности растворов сравнения и пробы, область линейности 50 – 500 мкг/см ³	—	324,7	Воздух – ацетилен
Марганец (ASTM E350-18)	0,005 – 2,0	Железо влияет на скорость распыления исследуемого раствора	Марганец металлический	Кислотное, остаток отбрасывают	Введение железа в количестве, эквивалентном количеству железа в пробе, кислотное разложение для соответствия кислотности растворов сравнения и пробы, область линейности 50 – 1000 мкг/см ³	—	279,5	Воздух – ацетилен
Никель (ASTM E350-18)	0,003 – 0,5	Железо подавляет аналитический сигнал	Никель металлический	Кислотное, в присутствии хлорной кислоты, остаток отбрасывают	Введение железа в количестве, эквивалентном количеству железа в пробе, кислотное разложение для соответствия кислотности растворов сравнения и пробы, область линейности 30 – 5000 мкг/см ³	—	352,5, 232,0	Воздух – ацетилен

ния и вопросы возникают при использовании как международных, так и межгосударственных стандартов на определение ванадия, хрома, меди, никеля и марганца в сталях и чугунах. И поскольку аттестационный анализ стандартных образцов предъявляет высокие требования к используемым методикам, в ряде случаев требуется внести изменения для увеличения точности определения элементов, а в других случаях целесообразно упростить и/или объединить несколько методик с сохранением их точности и воспроизводимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Житенко Л. П.** Национальные стандарты на методы анализа драгоценных металлов: проблемы и перспективы / Партнеры и конкуренты. 2006. № 5. С. 30 – 35.
2. ГОСТ 22536.7–88. Сталь углеродистая и чугун нелегированный. Методы определения хрома. — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 13 с.
3. ГОСТ 2604.6–77. Чугун легированный. Методы определения хрома. — М.: Изд-во стандартов, 2004.
4. ГОСТ 12350–78. Стали легированные и высоколегированные. Методы определения хрома. — М.: Изд-во стандартов, 1987. — 10 с.
5. ГОСТ 12351–2003. Стали легированные и высоколегированные. Методы определения ванадия. — М.: Стандартинформ, 2006. — 16 с.
6. ГОСТ 22536.12–88. Сталь углеродистая и чугун нелегированный. Методы определения ванадия. — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 11 с.
7. ГОСТ 2604.7–84. Чугун легированный. Методы определения ванадия. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. — 3 с.
8. ГОСТ 22536.8–87. Сталь углеродистая и чугун нелегированный. Методы определения меди. — М.: Изд-во стандартов, 1988. — 11 с.
9. ГОСТ 12355–78. Стали легированные и высоколегированные. Методы определения меди. — М.: Изд-во стандартов, 1986. — 17 с.
10. ГОСТ 2604.9–83. Чугун легированный. Методы определения меди. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. — 4 с.
11. ГОСТ Р ИСО 4943–2010. Сталь и чугун. Определение содержания меди. Спектрометрический метод атомной абсорбции в пламени. — М.: Стандартинформ, 2011. — 7 с.
12. ГОСТ 12352–81. Стали легированные и высоколегированные. Методы определения никеля. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 1999. — 7 с.
13. ГОСТ 22536.9–88. Сталь углеродистая и чугун нелегированный. Методы определения никеля. — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 11 с.
14. ГОСТ 2604.8–77. Чугун легированный. Методы определения никеля. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. — 4 с.
15. ГОСТ Р ИСО 4940–2010. Сталь и чугун. Определение содержания никеля. Спектрометрический метод атомной абсорбции в пламени. — М.: Стандартинформ, 2011. — 7 с.
16. ГОСТ 12348–78. Стали легированные и высоколегированные. Методы определения марганца. — М.: Стандартинформ, 2011. — 10 с.
17. ГОСТ 22536.5–87. Сталь углеродистая и чугун нелегированный. Методы определения марганца. — М.: Изд-во стандартов, 1988. — 12 с.
18. ГОСТ 2604.5–84. Чугун легированный. Методы определения марганца. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. — 7 с.
19. ГОСТ ISO/IEC 17025–2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. — М.: Стандартинформ, 2019. — 25 с.
20. **Хавезов И., Цалев Д.** Атомно-абсорбционный анализ: Пер. с болг. Г. А. Шейниной. — Л.: Химия, 1983. — 144 с.

21. НДИ 01.01.02.185–2019. Сталь, чугун. Определение массовой доли хрома. Атомно-абсорбционный метод. ФР.1.31. 2021.39496; опублик. 31.03.2021.
22. **Лазарев А. И., Харламов И. П., Яковлев П. Я. и др.** Справочник химика-аналитика. — М.: Металлургия, 1976. — 184 с.
23. НДИ 01.01.02.181–2019. Сталь, чугун. Определение массовой доли ванадия. Атомно-абсорбционный метод. ФР.1.31. 2021.39492; опублик. 31.03.2021.
24. НДИ 01.01.02.184–2019. Сталь, чугун. Определение массовой доли марганца и меди. Атомно-абсорбционный метод. ФР.1.31.2021.39495; опублик. 31.03.2021.
25. НДИ 01.01.02.183–2019. Сталь, чугун. Определение массовой доли никеля. Атомно-абсорбционный метод. ФР.1.31. 2021.39493; опублик. 31.03.2021.
26. ASTM E350-18. Standard test methods for chemical analysis of carbon steel, low-alloy steel, silicon electrical steel, ingot iron, and wrought iron / Book of standards. Vol. 03. 05. DOI: 10.1520/E0350-18
27. ASTM E351-18. Standard test methods for chemical analysis of cast iron — all types / Book of standards. Vol. 03. 05. DOI: 10.1520/E0351-18
28. ASTM E352-18. Standard test methods for chemical analysis of tool steels and other similar medium- and high-alloy steels / Book of standards. Vol. 03. 05. DOI: 10.1520/E0352-18

REFERENCES

1. **Zhitenko L. P.** National standards for the analysis methods of precious metals: problems and perspectives / Partn. Konkur. 2006. N 5. P 30 – 35 [in Russian].
2. GOST 22536.7–88. Carbon steel and unalloyed cast iron. Methods for determination of chromium. — Moscow: Izd. standartov, 1989. — 13 p. [in Russian].
3. GOST 2604.6–77. Alloy cast iron. Methods for determination of chromium content. — Moscow: Izd. standartov, 2004 [in Russian].
4. GOST 12350–78. Alloyed and high-alloyed steels. Methods of chromium determination. — Moscow: Izd. standartov, 1987. — 10 p. [in Russian].
5. GOST 12351–2003. Alloyed and highalloyed steels. Methods for determination of vanadium. — Moscow: Standardinform, 2006. — 16 p. [in Russian].
6. GOST 22536.12–88. Carbon steel and unalloyed cast iron. Methods for determination of vanadium. — Moscow: Izd. standartov, 1989. — 11 p. [in Russian].
7. GOST 2604.7–84. Alloy cast iron. Methods for determination of vanadium. — Moscow: Izd. standartov, 2004. — 3 p. [in Russian].
8. GOST 22536.8–87. Carbon steel and unalloyed cast iron. Methods for determination of copper. — Moscow: Izd. standartov, 1988. — 11 p. [in Russian].
9. GOST 12355–78. Alloyed and high-alloyed steels. Methods of copper determination. — Moscow: Izd. standartov, 1986. — 17 p. [in Russian].
10. GOST 2604.9–83. Alloy cast iron. Methods for determination of copper. — Moscow: IPK Izd. standartov, 2004. — 4 p. [in Russian].
11. GOST 4943–2010. Steel and iron. Determination of copper content. Flame atomic absorption spectrometric method. — Moscow: Standardinform, 2011. — 7 p. [in Russian].
12. GOST 12352–81. Steels alloyed and highalloyed. Methods for determination of nickel. — Moscow: IPK Izd. standartov, 1999. — 7 p. [in Russian].
13. GOST 22536.9–88. Carbon steel and unalloyed cast iron. Methods for determination of nickel. — Moscow: Izd. standartov, 1989. — 11 p. [in Russian].
14. GOST 2604.8–77. Alloy cast iron. Methods for determination of nickel. — Moscow: IPK Izd. standartov, 2004. — 4 p. [in Russian].
15. GOST 4940–2010. Steel and iron. Determination of nickel content. Flame atomic absorption spectrometric method. — Moscow: Standardinform, 2011. — 7 p. [in Russian].

16. GOST 12348–78. Alloyed and high-alloyed steels. Methods of manganese determination. — Moscow: Standardinform, 2011. — 10 p. [in Russian].
17. GOST 22536.5–87. Carbon steel and unalloyed cast iron. Methods for determination of manganese. — Moscow: Izd. standartov, 1988. — 12 p. [in Russian].
18. GOST 2604.5–84. Alloy cast iron. Methods for determination of manganese. — Moscow: IPK Izd. standartov, 2004. — 7 p. [in Russian].
19. GOST ISO/IEC 17025–2019. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. — Moscow: Standartinform, 2019. — 25 p. [in Russian].
20. **Khavezov I., Tsalev D.** Atomic-absorption analysis. — Leningrad: Khimiya, 1983. — 144 p. [in Russian].
21. NDI 01.01.02.185–2019. Steel, cast iron. Determination of chromium content. Atomic absorption spectrometric method. FR.1.31.2021.39496; publ. 31.03.2021 [in Russian].
22. **Lazarev A. I., Kharlamov I. P., Yakovlev P. Ya., et al.** Analytical chemist's handbook. — Moscow: Metallurgiya, 1976. — 184 p. [in Russian].
23. NDI 01.01.02.181–2019. Steel, cast iron. Determination of vanadium content. Atomic absorption spectrometric method. FR.1.31.2021.39492; publ. 31.03.2021 [in Russian].
24. NDI 01.01.02.184–2019. Steel, cast iron. Determination of manganese and copper contents. Atomic absorption spectrometric method. FR.1.31.2021.39495; publ. 31.03.2021 [in Russian].
25. NDI 01.01.02.183–2019. Steel, cast iron. Determination of nickel content. Atomic absorption spectrometric method. FR.1.31.2021.39493; publ. 31.03.2021 [in Russian].