

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-1-II-69-76>

АНАЛИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АТОМНО-ЭМИССИОННОГО СПЕКТРОМЕТРА POLYVAC E980 (HILGER ANALYTICAL), МОДЕРНИЗИРОВАННОГО МНОГОКАНАЛЬНЫМ АНАЛИЗАТОРОМ ЭМИССИОННЫХ СПЕКТРОВ МАЭС

© **Татьяна Александровна Лёзова¹, Наталья Альбертовна Сарычева^{1*},
Виктор Геннадьевич Гаранин², Антон Валерьевич Борисов^{2,3}**

¹ Горьковский автомобильный завод, Россия, 603004, г. Нижний Новгород, пр. Ленина, д. 88;
*e-mail: sarychevana@gaz.ru

² ООО «ВМК-Оптоэлектроника», Россия, 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д. 1.

³ Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д. 1.

*Статья поступила 13 октября 2021 г. Поступила после доработки 20 ноября 2021 г.
Принята к публикации 24 ноября 2021 г.*

Представлены результаты модернизации вакуумного атомно-эмиссионного спектрометра Polyvac E980 (Hilger Analytical, Великобритания) многоканальным анализатором эмиссионных спектров МАЭС: была полностью обновлена линия подачи аргона в искровой штатив и установлен прецизионный регулятор массового расхода с блоком микропроцессорного управления для регулирования подачи аргона. Новый регулятор позволил изменить скорость подачи аргона для разных режимов работы и фиксировать ее текущие значения с сохранением данных для каждого спектра. Блок микропроцессорного управления также обеспечивает согласованную работу контрольных линий и блокировку работы искрового генератора в случае открытого штатива или отсутствия аргона. Обновленный искровой вакуумный спектрометр, изначально предназначенный для анализа сплавов на основе железа, можно использовать для определения состава цветных сплавов. Разработаны аналитические программы для спектрального экспресс-анализа алюминиевых сплавов типа АК12М2 и АК9ч. Основная методическая сложность такого анализа состоит в том, что в одном образце необходимо определять высокие содержания кремния, меди и железа наряду с примесным содержанием кальция. Кальций оказывает негативное влияние на качество отливок, и возможность его определения была важным фактором при проведении модернизации. После проведения всех подготовительных работ и построения градуировочных графиков исследовали кратковременную и долговременную повторяемость результатов анализа стандартных образцов алюминиевых сплавов с использованием модернизированного спектрометра. Полученные результаты показали полное соответствие требованиям нормативной документации по определению состава алюминиевых сплавов.

Ключевые слова: атомно-эмиссионный спектральный анализ; алюминиевые сплавы; стандартные образцы; многоканальный анализатор эмиссионных спектров МАЭС.

ANALYSIS OF ALUMINUM ALLOYS ON A POLYVAC E980 (HILGER ANALYTICAL) ATOMIC EMISSION SPECTROMETER MODIFIED WITH A MULTI-CHANNEL ANALYZER OF EMISSION SPECTRA (MAES)

© **Tat'yana A. Lyozova¹, Nataliya A. Sarycheva^{1*},
Viktor G. Garanin², Anton V. Borissov^{2,3}**

¹ Gorky Automobile Plant, 88, prosp. Lenina, Nizhny Novgorod, 603004, Russia; *e-mail: sarychevana@gaz.ru

² VMK-Optoektronika, 1, prosp. Akademika Koptuga, Novosibirsk, 630090, Russia.

³ Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 1, prosp. Akademika Koptuga, Novosibirsk, 630090, Russia.

Received October 13, 2021. Revised November 20, 2021. Accepted November 24, 2021.

A Polyvac E980 (Hilger Analytical) photoelectric vacuum optical emission spectrometer has been modified with a multichannel analyzer of emission spectra (MAES). The line of argon supply to the spark stand has been completely renewed. A precision mass flow controller with a microprocessor control unit has been installed to adjust the argon supply for different operation modes and fix the current values with the possibility of saving data for each spectrum. The microprocessor control unit coordinates the operation of the control lines and interrupts the operation of the spark generator when the stand is open or argon is

absent. The modified vacuum spark spectrometer, originally designed for the analysis of iron-based alloys, has become suitable for determining the composition of non-ferrous alloys. Analytical programs have been developed for the rapid spectral analysis of AK12M2 and AK9ch aluminum alloys. The main methodological difficulty of the analysis is attributed to the necessity of monitoring high concentrations of silicon, copper, and iron along with the content of calcium impurity in the same sample. Calcium has a negative effect on the quality of castings, thus making the possibility of Ca determination an important motivation for the modification. After the preparatory work and the construction of calibration curves, the short-term and long-term repeatability of the results of spectral analysis of standard samples of aluminum alloys has been studied on the modified spectrometer. The results completely meet the standard requirements for determining the composition of aluminum alloys.

Keywords: atomic emission spectral analysis; aluminum alloys; reference materials; multichannel analyzer of emission spectra (MAES).

Введение

С 1986 г. в химических лабораториях ОАО «Горьковский автомобильный завод» для спектрального анализа сплавов на основе железа, меди и алюминия используют английские спектрометры Polyvac (Hilger Analytical) моделей E980, E982, E983, которые различаются источниками возбуждения спектра и набором выбранных аналитических линий. Спектрометры Polyvac E980 и Polyvac E982 были предназначены для анализа среднелегированных сталей, а также сплавов на основе меди и алюминия и оснащены дуговым генератором SY 274, а спектрометры Polyvac E983 с дуговым генератором SY 169 — для анализа чугунов и высоколегированных сталей. Существенный недостаток этих приборов состоит в невозможности регистрации дополнительной спектральной линии, изначально не заложенной при заказе спектрометра, из-за системы регистрации спектров на основе фотоэлектронных умножителей (ФЭУ).

В 2006 г. в химической лаборатории литейных цехов была проведена модернизация вакуумного атомно-эмиссионного спектрометра Polyvac E983 путем замены ФЭУ на многоканальный анализатор эмиссионных спектров МАЭС [1–5] производства ООО «ВМК-Оптоэлектроника» и замены английского программного обеспечения «PC-PLUS» на программный пакет «Атом 3.2» [6–10]. Штатный генератор SY 169 был оставлен в эксплуатации. В 2008 г. в спектрометре Polyvac E980 источник возбуждения спектра SY 274 заменили генератором «Шаровая молния 250» [11]. Полученные результаты опубликованы в работе [12]. В настоящее время с использованием этих спектрометров проводят анализ углеродистых и высоколегированных сталей и литейных чугунов.

В лаборатории производства цветного литья ПАО «ГАЗ» для анализа алюминиевых сплавов, латуней и бронз различных марок используют вакуумный атомно-эмиссионный спектрометр Polyvac E982. Источник возбуждения конденсированной дуги в аргоне SY274 имеет стандартные параметры разряда: напряжение — 650 В,

емкость — 20 мкФ, индуктивность — 120 мкГн; сопротивление — 3 Ом, частота разряда — 100 Гц. Спектрометр Polyvac E982 позволяет определять 33 химических элемента в черных и цветных сплавах. В 2020 г. возникла необходимость определения кальция в алюминиевых сплавах типа АК12М2, АК9ч. Кальций оказывает негативное влияние на качество отливок, способствует образованию усадочной пористости. Аналитическая линия кальция отсутствовала в спектрометре Polyvac E982 с ФЭУ, в связи с чем спектрометр Polyvac E980, предназначенный для анализа сплавов на основе железа, был модернизирован многоканальным анализатором эмиссионных спектров МАЭС со сборкой на основе новых линеек фотодетекторов БЛПП-4000 [13–15].

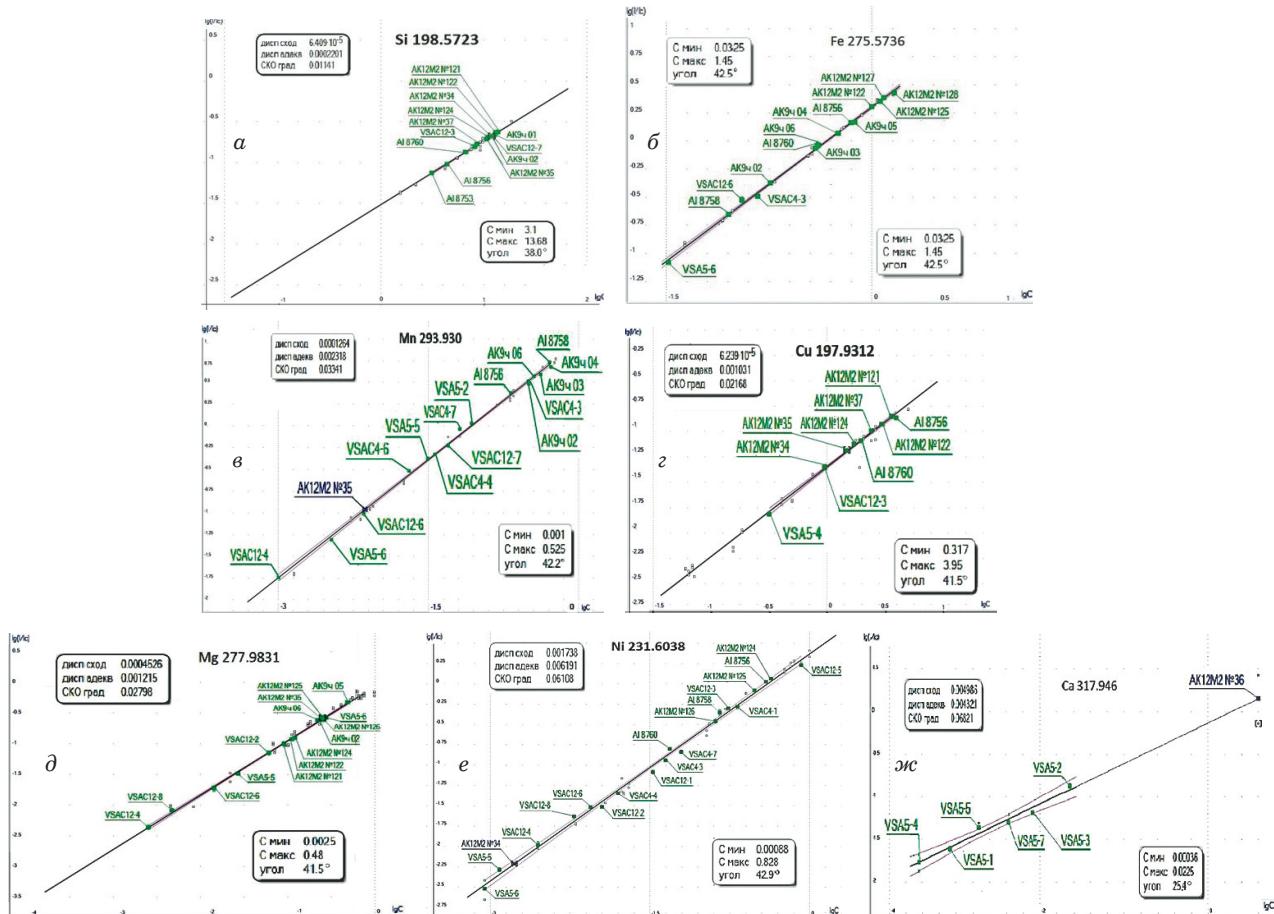
Цель работы заключалась в оценке метрологических характеристик результатов анализа цветных сплавов, выполненного с использованием модернизированного МАЭС спектрометра Polyvac E980.

Экспериментальная часть

Сборка анализатора МАЭС из 14 линеек фотодетекторов БЛПП-4000, в которой кристаллы линеек расположены по дуге с радиусом 375 мм, была установлена вместо ФЭУ так, чтобы фоточувствительные области линеек совпадали с поверхностью фокусировки спектрометра Polyvac E982. При этом была обеспечена непрерывная регистрация спектров в диапазоне 185–331,6 нм без вакуумирования полихроматора.

Была полностью обновлена линия подачи аргона в искровой штатив: вместо поплавкового ротаметра для регулирования подачи установили прецизионный регулятор массового расхода с блоком микропроцессорного управления. Такая система позволила устанавливать скорость подачи аргона для разных режимов работы и фиксировать ее текущие значения для сохранения их на компьютере вместе с другой служебной информацией для каждого спектра.

Блок микропроцессорного управления, кроме регулирования потока аргона, обеспечивает со-



Градуировочные зависимости для определения ряда элементов в алюминиевых сплавах с использованием спектрометра Polyvac E980 с МАЭС: *a* — кремния (198,57 нм); *b* — железа (275,57 нм); *c* — марганца (293,93 нм); *d* — меди (197,93 нм); *e* — магния (277,98 нм); *f* — никеля (231,60 нм); *жс* — кальция (317,95 нм)

Calibration curves for the determination of elements in aluminum alloys using a Polyvac E980 spectrometer with MAES: *a* — silicon (198.57 nm); *b* — iron (275.57 nm); *c* — manganese (293.93 nm); *d* — copper (197.93 nm); *e* — magnesium (277.98 nm); *f* — nickel (231.60 nm); *жс* — calcium (317.95 nm)

гласованную работу контрольных линий и блокировку работы искрового генератора в случае открытого штатива или отсутствия аргона.

Исходный полихроматор был настроен на работу с 20 фотоумножителями на фиксированных длинах волн. Поэтому предварительно провели демонтаж узла выходных щелей, а также держателей зеркал и всех фотоумножителей. Входная щель шириной 50 мкм была заменена на новую шириной 20 мкм. Юстировку дифракционной решетки провели с учетом всех особенностей применяемого анализатора МАЭС, в итоге получили спектр с оптимальными яркостью и спектральным разрешением.

В регистрируемом спектральном диапазоне 185 – 331,6 нм есть аналитические линии основных определяемых примесей и легирующих элементов, в том числе кальция и стронция, возможность определения которых до установки анализатора МАЭС отсутствовала.

С использованием модернизированного спектрометра были построены градуировочные гра-

фики для определения основных легирующих элементов сплавов АК12М2 и АК9ч — кремния, железа, марганца, меди, магния, никеля, а также кальция для контроля его содержания в ходе плавки (рисунок).

Согласно паспортным данным СО содержат (%):

АК12М2 — 11,0 – 13,0 Si; 0,6 – 1,0 Fe; до 0,5 Mn; 1,8 – 2,5 Cu; до 0,15 Mg и до 0,003 Ca, а АК9ч — 8,0 – 10,5 Si; до 0,9 Fe; 0,2 – 0,5 Mn; до 0,3 Cu; 0,17 – 0,30 Mg и до 0,003 Ca.

Сложность анализа состоит в том, что в одном образце необходимо определять как макроэлементы (кремний, медь, железо), так и примесь кальция.

В условиях непрерывного производства важно, чтобы повторяемость и правильность результатов анализа сохранялись в течение рабочей смены. Для выбора наилучших аналитических пар оценили кратковременную повторяемость результатов анализа сплавов АК12М2 и АК9ч в течение 10 мин непрерывной работы спектромет-

ра для нескольких стандартных образцов, а также долговременную повторяемость результатов анализа стандартного образца № 121 сплава AK12M2 в течение 8 ч работы прибора. Кроме того, оценили повторяемость результатов анализа стандартного образца № 121 с использованием спектрометра Polyvac E982 с ФЭУ. Полученные данные представлены в табл. 1 – 6.

Обсуждение результатов

Оценку повторяемости проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 7728–81 [16]: расхождение между результатами параллельных определений элемента не должно превышать допускаемого расхождения d . Знаком (*) отмечены результаты анализа, для которых размах между максимальным и минимальным значениями мас-

Таблица 1. Результаты спектрального анализа (% масс.) образца СО № 27 сплава AK12M2, полученные в течение 10 мин непрерывной работы спектрометра Polyvac E980 с анализатором МАЭС

Table 1. Results of spectral analysis (%wt.) of reference material No. 27 of AK12M2 alloy obtained during 10-min continuous operation of a Polyvac E980 spectrometer with a MAES analyzer

Время измерения	Si 198,6 нм	Fe 275,5 нм	Mn 293,3 нм	Cu 197,9 нм	Mg 277,9 нм
8:30	10,4	0,633	0,184	1,97	0,097
8:31	10,5	0,642	0,186	2,01	0,102
8:32	10,9	0,629	0,186	2,11	0,100
8:33	10,9	0,607	0,196	2,12	0,099
8:34	11,0	0,601	0,197	2,09	0,100
8:35	10,4	0,658	0,186	2,06	0,106
8:37	10,7	0,636	0,185	2,02	0,105
8:38	10,5	0,676	0,191	2,07	0,114
8:39	10,8	0,659	0,190	2,07	0,109
8:40	10,5	0,669	0,187	2,05	0,114
Среднее значение, % масс.	10,7	0,64	0,189	2,06	0,105
Аттестованное значение, % масс.	10,64	0,68	0,161	1,85	0,095
ОСКО, %	2,0	3,9	2,4	2,2	5,8
Размах, % масс.	0,58	0,075*	0,013	0,14	0,017*
Норматив повторяемости, d	1,06	0,064	0,025	0,20	0,014

Таблица 2. Результаты спектрального анализа (% масс.) образца СО № 121 сплава AK12M2, полученные в течение 10 мин непрерывной работы спектрометра Polyvac E980 с анализатором МАЭС

Table 2. Results of spectral analysis (%wt.) of reference material No. 121 of AK12M2 alloy obtained during 10-min continuous operation of a Polyvac E980 spectrometer with a MAES analyzer

Время измерения	Si 198,6 нм	Fe 275,5 нм	Ni 231,6 нм	Cu 197,9 нм	Mg 277,9 нм
9:30	14,7	0,636	1,11	3,59	0,115
9:31	14,6	0,638	1,13	3,57	0,115
9:32	14,6	0,631	1,14	3,50	0,114
9:33	13,7	0,647	1,11	3,65	0,114
9:34	14,4	0,645	1,09	3,64	0,113
9:35	15,4	0,639	1,00	3,65	0,106
9:37	15,0	0,652	1,03	3,63	0,106
9:38	14,7	0,641	1,03	3,70	0,109
9:39	14,6	0,650	1,10	3,62	0,116
9:40	14,7	0,634	1,07	3,53	0,105
Среднее значение, % масс.	14,6	0,641	1,08	3,61	0,111
Аттесованное значение, % масс.	13,7	0,600	0,99	3,58	0,090
ОСКО, %	3,0	1,1	4,5	1,7	3,8
Размах, % масс.	1,7*	0,021	0,14*	0,20	0,010
Норматив повторяемости, d	1,45	0,064	0,11	0,36	0,015

свой доли элемента превышает норматив повторяемости d , который рассчитывали по формуле:

$$d = QS_r X,$$

где $Q = 2,77$ или $3,31$ — критическое значение отношения размаха результатов двух или трех параллельных определений соответственно к среднеквадратическому отклонению при довери-

тельной вероятности $P = 0,95$; S_r — относительное среднеквадратическое отклонение (ОСКО), характеризующее сходимость результатов параллельных определений (значения S_r приведены в таблицах ГОСТ 7728–81 [16]); X — среднее арифметическое результатов параллельных определений.

Сравнили ОСКО результатов определения элементов в различных стандартных образцах,

Таблица 3. Результаты спектрального анализа (% масс.) образца СО № 02 сплава АК9ч, полученные в течение 10 мин непрерывной работы спектрометра Polyvac E980 с анализатором МАЭС

Table 3. Results of spectral analysis (%wt.) of reference material No. 02 of AK9ch alloy obtained during 10-min continuous operation of a Polyvac E980 spectrometer with a MAES analyzer

Время измерения	Si 198,6 нм	Fe 275,3 нм	Mn 293,3 нм	Mg 277,9 нм
8:30	11,7	0,166	0,330	0,292
8:31	11,8	0,157	0,322	0,301
8:32	11,7	0,174	0,329	0,326
8:33	11,3	0,177	0,325	0,325
8:34	11,8	0,173	0,324	0,332
8:35	11,8	0,174	0,323	0,338
8:37	11,8	0,167	0,328	0,301
8:38	11,6	0,167	0,328	0,312
8:39	11,9	0,169	0,330	0,324
8:40	11,7	0,175	0,328	0,343
Среднее значение, % масс.	11,7	0,170	0,327	0,319
Аттестованное значение, % масс.	11,82	0,181	0,316	0,233
ОСКО, %	1,4	3,7	0,93	5,3
Размах, % масс.	0,64	0,020	0,009	0,051*
Норматив повторяемости, d	1,16	0,023	0,043	0,042

Таблица 4. Результаты спектрального анализа (% масс.) образца СО № 05 сплава АК9ч, полученные в течение 10 мин непрерывной работы спектрометра Polyvac E980 с анализатором МАЭС

Table 4. Results of spectral analysis (%wt.) of reference material No. 05 of AK9ch alloy obtained during 10-min continuous operation of a Polyvac E980 spectrometer with a MAES analyzer

Время измерения	Si 198,6 нм	Fe 275,3 нм	Mn 293,3 нм	Mg 277,9 нм
8:30	7,49	0,508	0,623	0,524
8:31	7,53	0,565	0,672	0,554
8:32	7,53	0,603	0,683	0,612
8:33	7,67	0,628	0,689	0,562
8:34	7,35	0,576	0,714	0,542
8:35	7,37	0,581	0,707	0,568
8:37	7,52	0,612	0,719	0,562
8:38	7,38	0,541	0,666	0,562
8:39	7,55	0,573	0,712	0,573
8:40	7,68	0,588	0,715	0,575
Среднее значение, % масс.	7,51	0,579	0,698	0,562
Аттестованное значение, % масс.	7,31	0,745	0,809	0,480
ОСКО, %	1,5	6,0	4,4	4,3
Размах, % масс.	0,34	0,12*	0,096*	0,088*
Норматив повторяемости, d	0,745	0,057	0,069	0,056

Таблица 5. Результаты спектрального анализа (% масс.) образца СО № 121 сплава AK12M2, полученные в течение 8 ч непрерывной работы спектрометра Polyvac E980 C анализатором МАЭС

Table 5. Results of spectral analysis (%wt.) of reference material No. 121 of AK12M2 alloy obtained during 8-h continuous operation of a Polyvac E980 spectrometer with a MAES analyzer

Время измерения	Si 198,6 нм	Fe 275,3 нм	Ni 231,6 нм	Cu 197,9 нм	Mg 277,9 нм
1 серия 9:00	14,8	0,669	0,959	3,29	0,088
	14,7	0,645	0,911	3,56	0,090
	14,9	0,642	0,901	3,60	0,090
2 серия 10:00	14,6	0,640	0,922	3,58	0,092
	15,2	0,681	0,935	3,51	0,086
	14,4	0,665	0,947	3,51	0,088
3 серия 11:00	15,0	0,641	0,922	3,63	0,097
	14,6	0,655	0,873	3,58	0,083
	14,5	0,654	0,860	3,58	0,081
4 серия 12:00	14,7	0,642	0,880	3,64	0,087
	14,6	0,650	0,915	3,68	0,092
	14,4	0,665	0,857	3,62	0,077
5 серия 13:00	15,0	0,690	0,987	3,33	0,093
	15,2	0,655	0,904	3,60	0,095
	15,2	0,669	0,914	3,57	0,092
6 серия 14:00	15,2	0,672	0,907	3,60	0,093
	15,3	0,691	0,945	3,47	0,093
	14,8	0,665	1,01	3,50	0,099
7 серия 15:00	15,2	0,659	0,987	3,54	0,102
	14,5	0,646	1,05	3,52	0,104
	14,4	0,657	1,02	3,43	0,095
8 серия 16:00	14,5	0,658	0,987	3,59	0,099
	14,5	0,647	1,04	3,57	0,100
	14,5	0,656	1,02	3,63	0,100
Среднее значение, % масс.	14,8	0,659	0,929	3,55	0,092
Аттестованное значение, % масс.	13,7	0,600	0,990	3,58	0,090
ОСКО, %	2,1	2,2	6,0	2,6	7,4
Размах, % масс.	0,93	0,051	0,19*	0,39*	0,027*
Норматив повторяемости, <i>d</i>	1,47	0,065	0,09	0,35	0,024

полученные с использованием спектрометров Polyvac E980 с анализатором МАЭС и Polyvac E982 с ФЭУ (табл. 7). Из таблицы следует, что повторяемость результатов анализа для Polyvac E980 с МАЭС сравнима с соответствующими значениями для Polyvac E982 с ФЭУ.

Заключение

Таким образом, модернизация вакуумного атомно-эмиссионного спектрометра Polyvac E980 с ФЭУ (Hilger Analytical, Великобритания) многоканальным анализатором эмиссионных спектров МАЭС позволила применять спектрометр, изначально предназначенный для анализа сплавов на основе железа, для анализа алюминиевых сплавов.

Регистрируемый спектральный диапазон дает возможность в любое время добавить новые аналитические линии или расширить число определяемых элементов с использованием программного обеспечения (достаточно зарегистрировать спектры дополнительных образцов сравнения).

Оценена кратковременная и долговременная повторяемость результатов анализа сплава AK12M2: показано, что спектрометр Polyvac E980 с анализатором МАЭС можно использовать в условиях непрерывного производства.

ЛИТЕРАТУРА

- Лабусов В. А., Попов В. И., Путымаков А. Н. и др. Анализаторы МАЭС и их использование в качестве систем регистрации и обработки атомно-эмиссионных спектров / Аналитика и контроль. 2005. Т. 9. № 2. С. 110 – 115.

Таблица 6. Результаты спектрального анализа (% масс.) образца СО № 121 сплава AK12M2, полученные в течение 10 мин непрерывной работы спектрометра Polyvac E980 с ФЭУ

Table 6. Results of spectral analysis (%wt.) of reference material No. 121 of AK12M2 alloy obtained during 10-min continuous operation of the Polyvac E980 spectrometer with a PMT

Время измерения	Si 390,5 нм	Fe 239,5 нм	Ni 341,4 нм	Cu 327,4 нм	Mg 279,1 нм
9:30	14,42	0,545	0,831	3,61	0,082
9:31	15,04	0,561	0,867	3,63	0,087
9:32	14,74	0,550	0,849	3,60	0,085
9:33	14,48	0,574	0,834	3,67	0,086
9:34	14,35	0,545	0,841	3,60	0,085
9:35	14,66	0,537	0,854	3,56	0,085
9:37	15,07	0,566	0,846	3,60	0,087
9:38	15,58	0,595	0,868	3,59	0,090
9:39	15,53	0,622	0,878	3,52	0,094
Среднее значение, % масс.	14,87	0,566	0,852	3,60	0,087
Аттесованное значение, % масс.	13,7	0,600	0,990	3,58	0,090
ОСКО, %	3,09	4,85	1,90	1,16	3,98
Размах	1,23	0,085*	0,047	0,15	0,012
Норматив повторяемости, <i>d</i>	1,48	0,056	0,084	0,36	0,023

Таблица 7. Относительные среднеквадратические отклонения (%) результатов анализа СО алюминиевых сплавов

Table 7. Relative standard deviations for the results of analysis of the reference materials of aluminum alloys

Определяемый элемент	Polyvac E980 с МАЭС				Polyvac E982 с ФЭУ
	CO 121	CO27	CO 02	CO 05	CO 121
Si	3,0	2,0	1,4	1,5	3,09
Fe	1,1	3,9	3,7	6,0	4,85
Mn	—	2,4	0,93	4,4	—
Cu	1,7	2,2	—	—	1,16
Mg	3,8	5,8	5,3	4,3	3,98
Ni	4,5	—	—	—	1,90

2. **Лабусов В. А.** Многокристалльные сборки многоканальных анализаторов атомно-эмиссионных спектров / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. Спецвыпуск. С. 13 – 17.
3. **Лабусов В. А.** Приборы и комплексы компаний «ВМК-Оптоэлектроника» для атомно-эмиссионного спектрального анализа. Современное состояние / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 1. Ч. II. С. 12 – 21.
4. **Лабусов В. А., Кайдалов С. А., Щербакова О. И., Кошевров В. В.** Метрологическое обеспечение комплексов приборов для атомно-эмиссионного спектрального анализа с анализаторами МАЭС / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. Спецвыпуск. С. 40 – 46.
5. **Путынаков А. Н., Попов В. И., Лабусов В. А., Борисов А. В.** Новые возможности модернизированных спектральных приборов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. Спецвыпуск. С. 26 – 28.
6. **Гаранин В. Г., Неклюдов О. А., Петроченко Д. В. и др.** Программное обеспечение атомного спектрального анализа «Атом» / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 1. Ч. II. С. 103 – 111. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-103-111
7. **Панкратов С. В., Лабусов В. А., Неклюдов О. А., Ващенко П. В.** Автоматическая градуировка спектрометров с анализаторами МАЭС по длинам волн (профилирование) / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 1. Ч. II. С. 128 – 134.
8. **Шаталов И. Г., Лабусов В. А., Неклюдов О. А., Панкратов С. В.** Автоматическое профилирование многоканальных спектрометров с анализаторами МАЭС / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 1. Ч. II. С. 74 – 77.
9. **Панкратов С. В., Лабусов В. А.** Оценка содержания элементов при автоматическом качественном анализе вещества с использованием функции кросс-корреляции / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 1. Ч. II. С. 132 – 138. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-83-1-II-132-138
10. **Панкратов С. В., Лабусов В. А., Неклюдов О. А.** Качественный элементный анализ вещества с использованием функции кросс-корреляции / Аналитика и контроль. 2013. Т. 17. № 1. С. 33 – 40.
11. **Рашенко В. В.** Спекtroаналитические генераторы «Шаровая молния». Модернизация и расширение ассортимента приборов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 1. Ч. II. С. 127 – 128. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-83-1-II-127-129
12. **Сарычева Н. А.** Метрологическая оценка результатов спектрального анализа углеродистой стали, выполненного на вакуумных атомно-эмиссионных спектрометрах Polyvac E980 и Polyvac E983 с анализатором МАЭС и генератором «Шаровая молния 250» / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 1. Ч. II. С. 75 – 79.
13. **Бабин С. А., Селинин Д. О., Лабусов В. А.** Быстродействующие анализаторы МАЭС на основе линеек фотодетекторов

- ров БЛПП-2000 и БЛПП-4000 / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 1. Ч. II. С. 96 – 102. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-96-102
14. **Бабин С. А., Лабусов В. А., Селионин Д. О., Дзюба А. А.** Быстро действующие анализаторы МАЭС на основе линеек БЛПП-2000 / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 1. Ч. II. С. 108 – 113.
 15. **Селионин Д. О., Бабин С. А., Лабусов В. А.** Высокоскоростные анализаторы МАЭС с интерфейсом Gigabit Ethernet / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 1. Ч. II. С. 39 – 43.
 16. ГОСТ 7727-81. Сплавы алюминиевые. Методы спектрального анализа. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. — 13 с.

REFERENCES

1. **Labusov V. A., Popov V. I., Putmakov A. N., et al.** MAES analyzers and their usage as systems for registration and processing of atomic-emission spectra / Analit. Kontrol'. 2005. Vol. 9. N 2. P. 110 – 115 [in Russian].
2. **Labusov V. A.** Multichip assemblies of multichannel analyzers of atomic emission spectra / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2007. Vol. 73. Special Issue. P. 13 – 17 [in Russian].
3. **Labusov V. A.** Devices and Systems for Atomic Emission Spectroscopy Produced by «VMK-Optoelektronika»: State-of-the-Art / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 1. Part II. P. 12 – 21 [in Russian].
4. **Labusov V. A., Kaidalov S. A., Shcherbakova O. I., Koshelev V. V.** Metrological support of instrument complexes for atomic emission spectral analysis with MAES analyzers / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2007. Vol. 73. Special Issue. P. 40 – 46 [in Russian].
5. **Putmakov A. N., Popov V. I., Labusov V. A., Borisov A. V.** New possibilities of modernized spectral instruments / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2007. Vol. 73. Special Issue. P. 26 – 28 [in Russian].
6. **Garanin V. G., Neklyudov O. A., Petrochenko D. V., et al.** «Atom» software for atomic spectral analysis / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2019. Vol. 85. N 1. Part II. P. 103 – 111 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-103-111
7. **Pankratov S. V., Labusov V. A., Neklyudov O. A., Vashchenko P. V.** Automatic Wavelength Calibration of the Spectrometers with MAES Analyzers (Profiling) / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 1. P. 128 – 134 [in Russian].
8. **Shatalov I. G., Labusov V. A., Neklyudov O. A., Pankratov S. V.** Automatic profiling of multichannel spectrometers with MAES analyzers / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2012. Vol. 78. N 1. Part II. P. 74 – 77 [in Russian].
9. **Pankratov S. V., Labusov V. A.** Evaluation of the Element Content in an Automatic Qualitative Analysis of Substances Using a Cross-Correlation Function / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2017. Vol. 83. 1. Part II. P. 132 – 138 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-83-1-II-132-138
10. **Pankratov S. V., Labusov V. A., Neklyudov O. A.** Qualitative elemental analysis using a crosscorrelation function / Analit. Kontrol'. 2013. Vol. 17. N 1. P. 33 – 40 [in Russian].
11. **Rashchenko V. V.** Spectroanalytical Generators “Sharovaya Molniya”: Upgrading and Diversification / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2017. Vol. 83. N 1. Part II. P. 127 – 128. [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-83-1-II-127-129
12. **Sarycheva N. A.** Metrological Evaluation of the Results of Spectral Analysis of Carbon Steel Performed on Polivac E980 and E983 Atomic Emission Vacuum Spectrometers with a MAES Analyzer and a Sharovaya Molniya 250 Generators / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 1. P. 75 – 79 [in Russian].
13. **Babin S. A., Selyunin D. O., Labusov V. A.** High-Speed Multichannel MAES Analyzers Based on BLPP-2000 and BLPP-4000 Photodetector Arrays / Inorg. Mater. 2020. Vol. 56. N 14. P. 1431 – 1435. DOI: 10.1134/S0020168520140022
14. **Babin S. A., Labusov V. A., Selyunin D. O., Dzyuba A. A.** BLPP-2000 Array Based High-Speed Multichannel Analyzers of Atomic Emission Spectra / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 1. P. 108 – 113 [in Russian].
15. **Selyunin D. O., Babin S. A., Labusov V. A.** High-speed MAES analyzers with Gigabit Ethernet interface / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2012. Vol. 78. N 1. P. 39 – 43 [in Russian].
16. Interstate Standard GOST 7727-81. Aluminium alloys. Methods of spectral analysis. — Moscow: IPK Izd. Standartov, 2002. — 13 p. [in Russian].