

УДК 543.423

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРОМЕТРА «ГРАНД-ЭКСПЕРТ» ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ МАГНИЯ, ТИТАНА И АЛЮМИНИЯ

© В. Г. Гаранин¹

Статья поступила 26 сентября 2014 г.

Представлены результаты спектрального анализа аэрокосмических сплавов на основе магния, титана и алюминия с применением оптического вакуумного спектрометра «Гранд-Эксперт». Описаны условия анализа и приведены рабочие диапазоны определяемых содержаний.

Ключевые слова: атомно-эмиссионный спектральный анализ; магниевые сплавы; титановые сплавы; алюминиевые сплавы; анализатор МАЭС; спектрометр «Гранд-Эксперт».

Оперативное и точное определение состава металлов и сплавов в ходе производства материалов, используемых в авиации и космонавтике, необходимо при контроле качества продукции для этих отраслей. Решение о соответствии сплава производственным требованиям должно быть принято в течение 3 – 5 мин. Задержки ведут к дорогостоящим простоям производственных линий, а ошибка в составе продукции может стать причиной поломки ответственной детали во время эксплуатации самолетов и космических аппаратов.

Одними из распространенных объектов анализа в заводских лабораториях являются сплавы на основе титана, алюминия и магния. Многие предприятия имеют оборудование для проведения анализа широко распространенных алюминиевых сплавов типа АК, АМГ или Д16 по ГОСТ [1 – 4]. Количество лабораторий, проводящих определение состава сплавов на основе магния и титана [5, 6], ограничено предприятиями, производящими (ВСМПО АВИСМА, КУМЗ,

ТМК) и потребляющими (КнаАЗ, НАЗ им. Чкалова, Иркутский авиазавод, УУАЗ) соответствующую продукцию, а также научно-исследовательскими лабораториями ВИАМ, ВИЛС, МИСИС, ИМЕТ РАН, ЦНИИ КМ «Прометей» и рядом других [7 – 14].

В работе [7] особо отмечено, что «современная авиационная техника — это техника с многоразовой и длительной эксплуатацией (30000 – 60000 летных часов). Ее изделия находятся под воздействием циклических нагрузок, температуры и атмосферной среды».

Российские предприятия при изготовлении авиационной техники используют «упрочняемые термической обработкой высокопрочные алюминиевые сплавы системы Al – Zn – Mg – Cu и сплавы средней и повышенной прочности системы Al – Mg – Cu. Они являются конструкционным материалом для обшивки и внутреннего силового набора элементов планера самолета (фюзеляж, крыло, киль и др.). Свариваемые алюминиевые сплавы систем Al – Mn, Al – Mg, Al – Cu, Al – Mg – Li, Al – Mg – Si применяют для изготовления планера, бортовых систем, шасси, лопастей воздушного винта, приборов и элементов внутренней

¹ ООО «ВМК-Оптоэлектроника»; Конструкторско-технологический институт вычислительной техники СО РАН, г. Новосибирск, Россия; e-mail: vs@vmk.ru

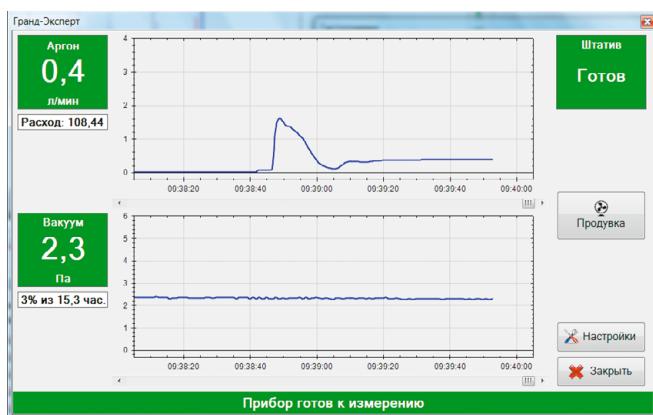


Рис. 1. Окно подпрограммы управления спектрометром «Гранд-Эксперт»

отделки салона» [7]. Подробная информация о применении алюминиевых и титановых сплавов в ответственных деталях современных самолетов представлена в работах [9, 10].

Цель настоящей работы состоит в адаптации существующих методик [3 – 6] прямого спектрального анализа алюминиевых, титановых и магниевых сплавов с высокими содержаниями легирующих примесей (лития, циркония, скандия, церия и других редкоземельных элементов) для спектрометра «Гранд-Эксперт».

Многоканальный спектрометр «Гранд-Эксперт»

Определение обычного набора примесей (Cu, Fe, Ti, Al, Si, Ni, Mn, Mg) в алюминиевых и титановых сплавах с помощью спектрометра «Гранд-Эксперт» было рассмотрено в работах [15, 16]. Основу спектрометра составляют вакуумированный полихроматор высокого разрешения (0,4 нм/мм) с рабочим диапазоном длин волн 170 – 350 нм и воздушный полихроматор среднего разрешения (1,1 нм/мм) с диапазоном 350 – 700 нм.

Вакуумной системой и подачей аргона в искровой штатив спектрометра управляет микропроцессорный блок, который автономно поддерживает вакуум, по командам компьютера включает продувку штатива во время ожидания и экспозиции, а также измеряет давление в вакуумном корпусе и поток аргона через штатив. Для дозированной подачи аргона применяется специальный регулятор массового расхода аргона, откалиброванный для работы в рабочих режимах искрового штатива от 0,2 до 3 л/мин.

Компьютерное управление спектрометром «Гранд-Эксперт» (рис. 1) позволяет задать поток аргона для каждого режима работы (продувки, обжига, экспозиции, ожидания), а также варьировать время перехода из режима ожидания в состояние «сна».

Возможность гибко варьировать параметры работы оборудования позволяет решить задачу анализа разных сплавов с высокой степенью легирования,

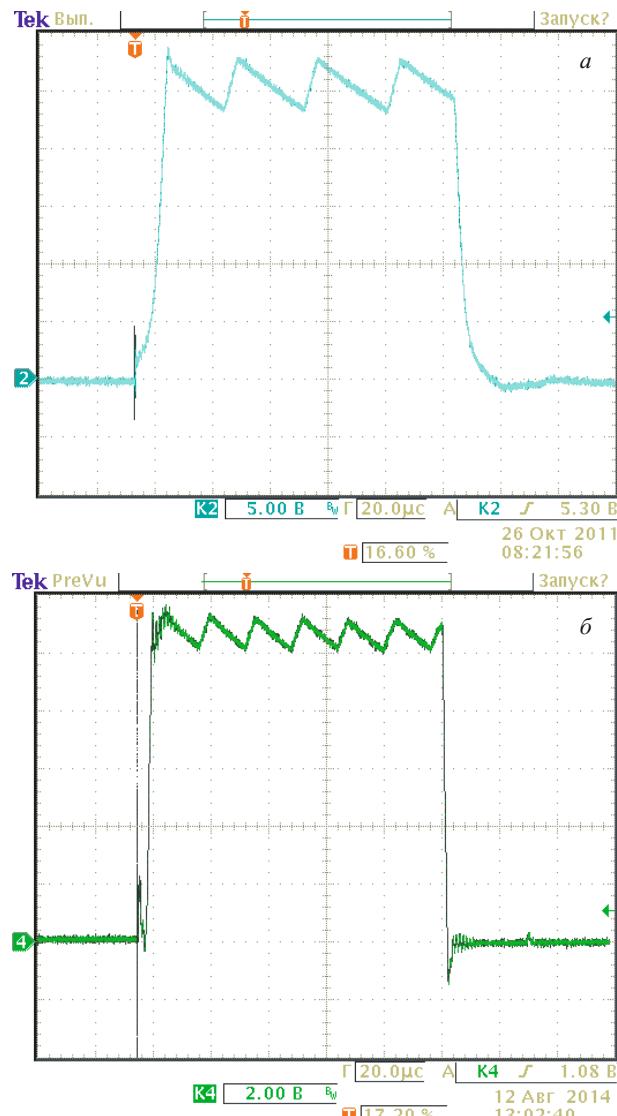


Рис. 2. Осциллограмма искрового импульса в атмосфере аргона для версий генератора ШМ-250А 2011 (а) и 2014 г. (б) в режиме 100 А, 100 мкс

особенно такими придающими жаропрочность анализируемым сплавам элементами, как церий и цирконий, которые обладают большим числом спектральных линий.

Для получения наиболее стабильных результатов генератор «Шаровая молния-250» был усовершенствован путем повышения быстродействия схемы стабилизации искрового импульса в два раза. На рис. 2 приведена осциллограмма искрового импульса в режиме разряда 100 А, 100 мкс для версий генераторов 2011 и 2014 годов. Фронты искрового импульса стали круче, а частота обновления тока увеличилась. Эти улучшения позволили получить хорошую стабильность на более коротких импульсах (рис. 3), снизить расход материала и эрозию поверхности при сохранении качества анализа и обеспечении представительности пробы исследуемого материала.

Параметры прибора и установки времен обжига и экспозиции для анализатора МАЭС и генератора

Таблица 1. Параметры спектрометра для анализа сплавов на основе алюминия, титана, магния

Базовая экспозиция МАЭС	100 мс		
Вольфрамовый противоэлектрод	6 мм, заточка на угол 90°		
Аналитический промежуток выставлен по калибру	3 мм		
Подача аргона в режиме продувки	2,0 (Mg), 3,0 (Al, Ti) л/мин		
Подача аргона в режиме анализа	1,0 (Mg), 2,0 (Al, Ti) л/мин		
Режим измерения	Режим генератора	Время, с	
Для анализа алюминиевых сплавов			
Продувка	6	Пауза	7
Обжиг	14	100 мкс, ток 50 А с частотой 300 Гц	24
1-я экспозиция	10	100 мкс, ток 50 А с частотой 300 Гц	
2-я экспозиция	5	50 мкс, ток 50 А с частотой 200 Гц	100
Для анализа титановых сплавов			
Продувка	5	Пауза	7
Обжиг	9	75 мкс, ток 50 А с частотой 300 Гц	100
Задержка	2		
Экспозиция	10	75 мкс, ток 50 А с частотой 300 Гц	
Для анализа магниевых сплавов			
Продувка	1	Пауза	7
Обжиг	12	80 мкс, ток 100 А с частотой 150 Гц	100
Задержка	2		
Экспозиция	5	80 мкс, ток 100 А с частотой 150 Гц	

ШМ-250А приведены в табл. 1. Для анализа алюминиевых сплавов применяется двухэтапная экспозиция, для остальных основ — экспозиция в один этап. Анализ алюминиевых и титановых сплавов проводят в условиях увеличенного тока аргона в силу большей зависимости результата от наличия кислорода в аргоне во время обыскривания.

Для выбора оптимальных пар «аналитическая линия — линия сравнения» использовали встроенный инструмент программы «Атом» — «Поиск аналитических линий» (рис. 4), обеспечивающий проверку разных комбинаций указанных линий в ускоренном режиме.

Рабочие диапазоны определяемых содержаний указаны в табл. 2. Примеры сплавов, которые могут быть проанализированы в соответствии с табл. 2:

Ti-основа — OT4, BT1-0, BT20, BT6, BT5-1, BT3-1, BT22, BT8, BT23 и др.;

Al-основа — AL5, AL9, AMГ, AM4-5, AK4, AB, B95, B93, AMц, D16, D1, AK8, AK6, 1420T, АЦР1У,

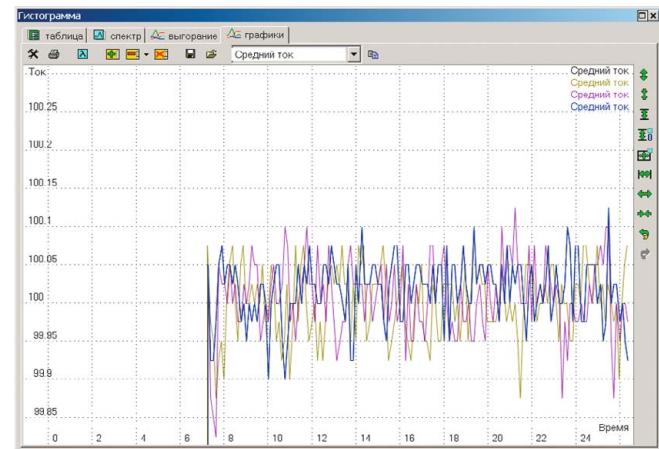


Рис. 3. Запись значений четырех параллельных измерений тока во время экспозиции для генератора ШМ-250А в режиме 150 Гц, 100 А, 80 мкс

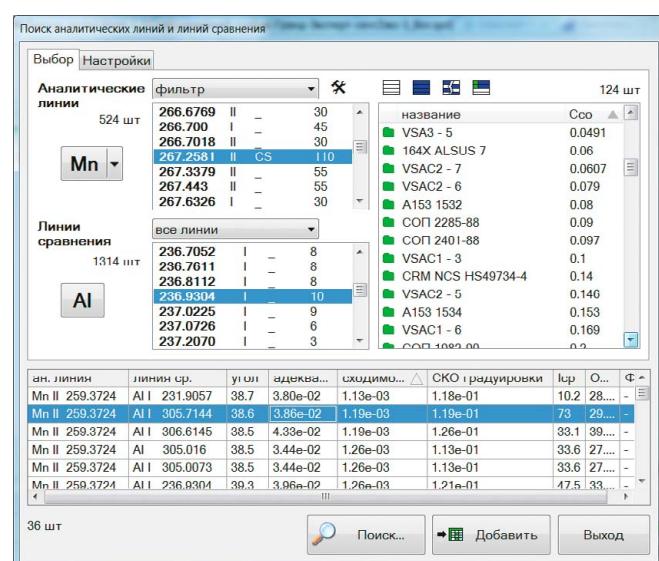


Рис. 4. Окно инструмента «Поиск аналитических линий»

B65-1, сплавы серий 14XX, 2XXX, 5XXX, 6XXX, 7XXX, 8XXX;

Mg-основа — MA5, MA8, Ml5, MA12, MA14 и др.

Особенности определения состава алюминиевых сплавов

Для анализа алюминиевых сплавов применяют двухэтапную экспозицию. На первом этапе с более интенсивным разрядом определяют большинство примесных и легирующих элементов. Во время второго генератор работает с меньшей нагрузкой, что обеспечивает более подходящие условия построения градуировочных зависимостей для определения высоких содержаний легирующих элементов в широком рабочем диапазоне концентраций.

При определении титана и лития в алюминиевых сплавах «перепад» определяемых концентраций со-

Таблица 2. Диапазоны определяемых содержаний легирующих элементов и примесей (% масс.) в различных сплавах

Определяемый элемент	Алюминий	Магний	Титан	Определяемый элемент	Алюминий	Магний	Титан
Al	Основа	0,01 – 11	0,01 – 9	Mo	—	—	0,03 – 9
Ag	—	0,01 – 1,6	—	Nb	—	—	0,5 – 4
As	0,001 – 0,03	—	—	Nd	—	0,03 – 3,5	—
B	0,001 – 0,1	0,01 – 0,1	—	Ni	0,001 – 3	0,002 – 0,3	0,05 – 0,2
Be	0,0001 – 0,3	0,001 – 0,01	—	Pb	0,005 – 0,5	—	—
Cd	0,0002 – 0,4	0,01 – 2	—	Sb	0,001 – 0,2	—	—
Ce	0,05 – 6,5	0,01 – 4	—	Sc	0,03 – 0,6	—	—
Cr	0,001 – 0,5	—	0,02 – 12	Si	0,01 – 13	0,01 – 2	0,01 – 2
Cu	0,006 – 9	0,01 – 0,2	—	Sn	0,005 – 0,4	0,002 – 0,1	0,06 – 3
Fe	0,01 – 2	0,001 – 0,05	0,08 – 2	Ti	0,002 – 3,5	—	Основа
In	—	0,05 – 1	—	V	0,002 – 0,2	—	0,05 – 6
La	—	0,01 – 2	—	W	—	—	0,1 – 1,5
Li	0,0001 – 4	1 – 12	—	Y	—	0,01 – 2,2	—
Mg	0,001 – 13	Основа	—	Zn	0,001 – 9	0,01 – 10	—
Mn	0,001 – 7	0,01 – 3	0,02 – 5	Zr	0,005 – 2	0,03 – 2	0,01 – 12

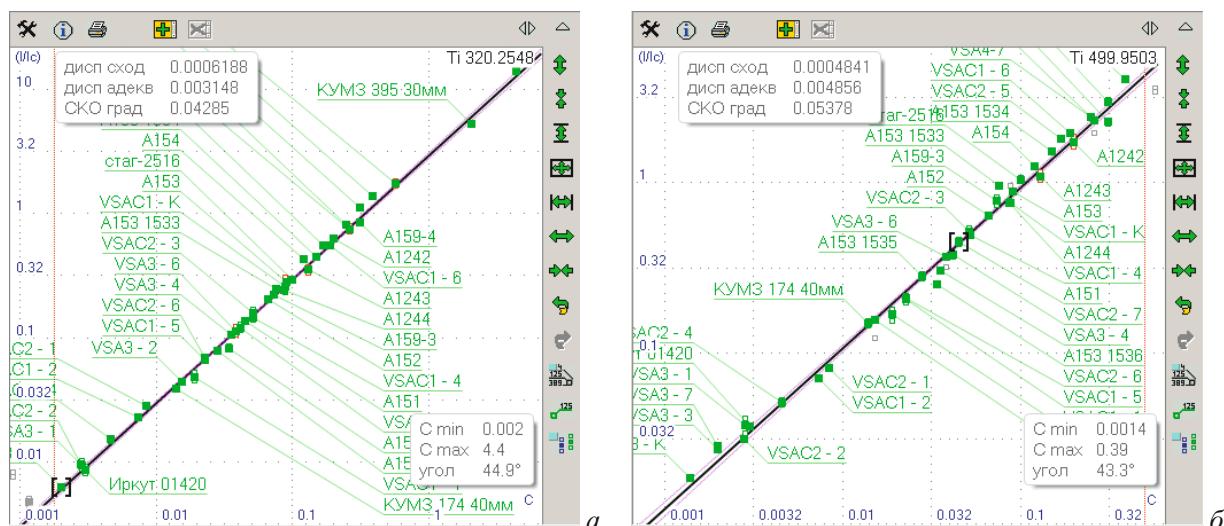


Рис. 5. Градуировочные графики для определения титана в алюминиевых сплавах по двум аналитическим линиям — 320,255 (а) и 499,95 (б) нм

ставляет почти три и четыре порядка величины соответственно. В результате поиска для титана было обнаружено несколько вариантов построения градуировочных графиков «одна линия на весь диапазон» (рис. 5). Для усреднения результата используют две линии титана — 320,255 и 499,95 нм в вакуумном и воздушном полихроматорах. Для построения графиков применены российские ГСО и СОП, ряд образцов КУМЗ и ООО «Виктори-Стандарт», а также ряд образцов состава алюминиевых сплавов иностранного производства.

При определении лития использовали большой набор образцов сравнения (27 шт.), что обеспечило возможность построения градуировочного графика для более чем 4 порядков величины концентрации (рис. 6). Для полного диапазона концентраций 0,0001 – 4 % масс. используют две аналитические линии лития в воздушном диапазоне спектра 610,365 и

497,174 нм с перекрыванием градуировочных графиков в районе 0,3 % масс. (СОП CRM NCS HS49730-3). При построении графиков для определения высоких содержаний лития использованы СОП и ГСО разных размеров (8, 30, 40, 45, 55 мм в диаметре), а также комплект CRM NCS HS49730 (сплавы Al-Cu-Mg-Li) с аттестованными содержаниями в диапазоне 0,4 – 1,8 % масс. Дополнительная точка на графике соответствует специально приготовленному сплаву алюминий – литий с 2,57 % масс. лития. В случае высоких содержаний лучший график для определения лития (как и других элементов) получается при уменьшении степени обыскривания — на втором этапе экспозиции.

Специфическим для аэрокосмической продукции является наличие легирующих добавок лития, церия, скандия, циркония в алюминиевых сплавах некоторых марок (серия сплавов 14XX [8], АЦР1У, 8019). Скандиний имеет достаточно большое количество спектраль-

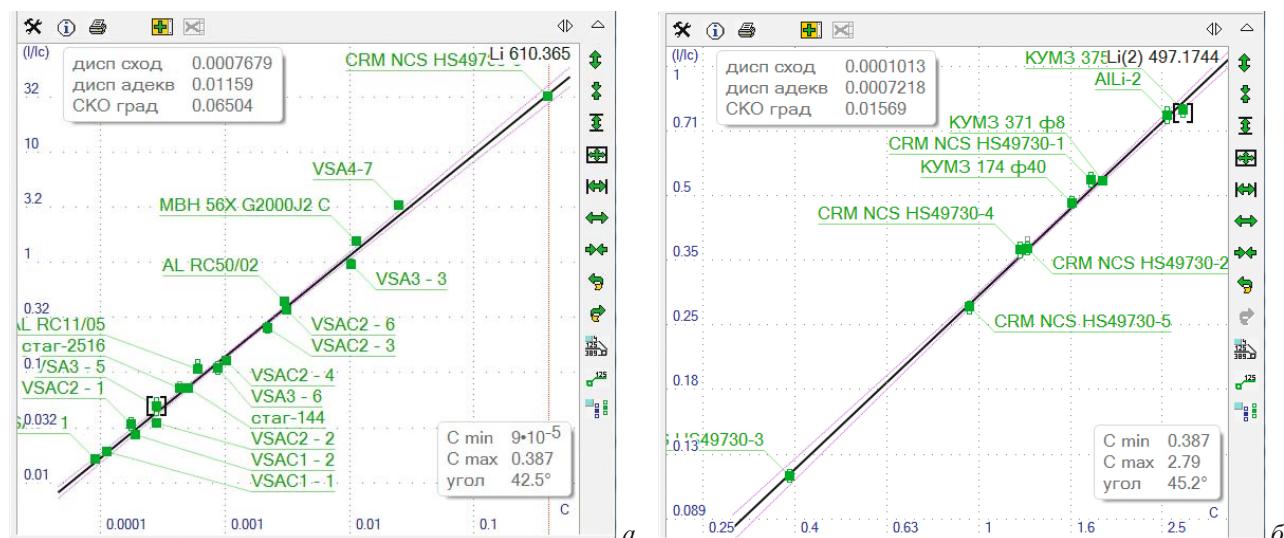


Рис. 6. Градуировочные графики для определения лития: *a* — при низких и средних содержаниях в алюминиевых сплавах по линии 610,365 нм; *b* — в сплавах Al-Li серии 14XX на втором этапе экспозиции по линии 497,174 нм

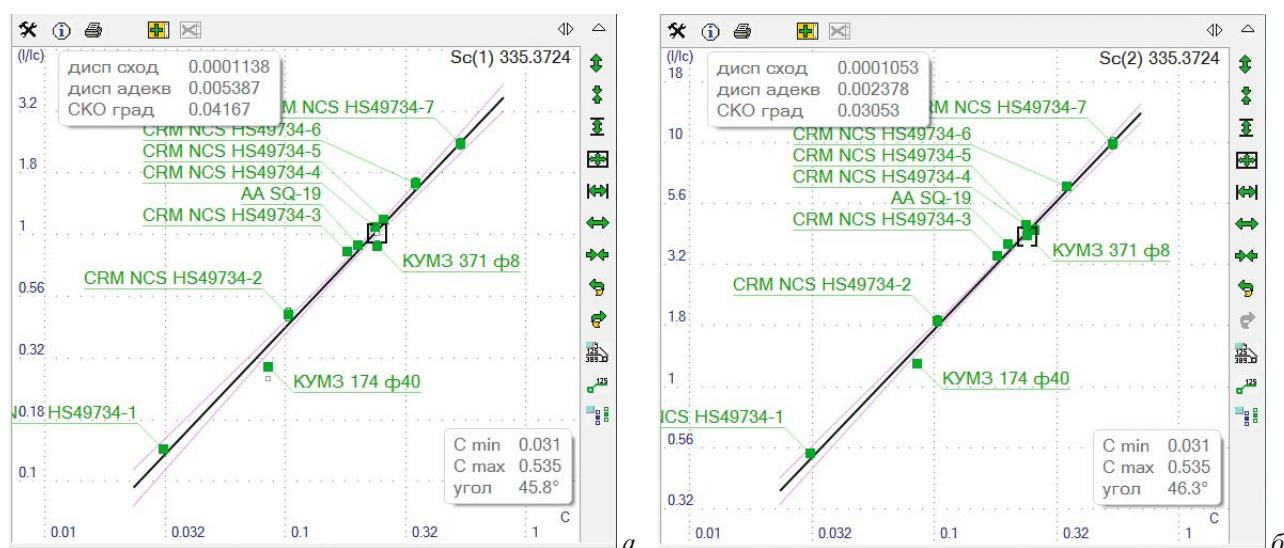


Рис. 7. Градуировочные графики для определения скандия в алюминиевых сплавах по аналитической линии 335,372 нм на первом (*a*) и втором (*b*) этапах экспозиции

ных линий для выбора подходящей. Для определения скандия в алюминиевых сплавах использовали аналитическую линию 335,372 нм (рис. 7), которую регистрировали вместе с линией сравнения (Al 305,903 нм) на втором этапе экспозиции (с меньшей длительностью искрового импульса), что обеспечивает лучшие, чем на первом этапе, значения дисперсий сходимости (0,000105 и 0,000114 соответственно) и адекватности (0,0024 и 0,0054 соответственно). Это связано с меньшим влиянием на результат анализа размера и диаметра пробы в таком режиме обискривания.

Количество доступных образцов сравнения для определения церия в алюминии очень мало, и с целью построения графика для определения высоких концентраций были специально изготовлены сплавы (лигатуры), содержащие 4,2 и 6,5 % масс. церия. Как видно из рис. 8, образцы разных производителей и спе-

циально приготовленные демонстрируют хорошую адекватность и сходимость, что позволяет получать достоверные результаты.

Особенности определения состава магниевых сплавов

Магний склонен к окислению при долгом нахождении на воздухе, по сравнению с алюминием не образует прочной оксидной пленки на поверхности, а по сравнению с титаном является довольно легко-плавким металлом. Необходимость определять в магнии алюминий, кремний, медь, железо, никель на довольно низком уровне (0,001 – 0,1 % масс.) предъявляет к аналитику такие дополнительные требования, как аккуратная подготовка прибора к работе, чистка штатаива и применение щадящих способов подготовки поверхности проб к анализу.

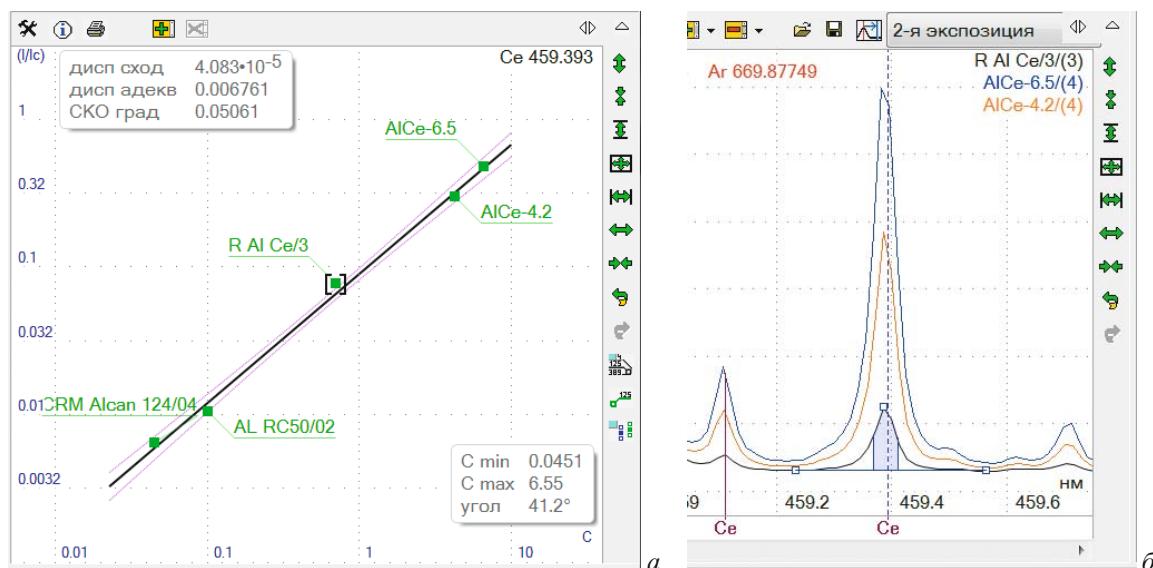


Рис. 8. Градуировочный график для определения церия в алюминиевых сплавах на втором этапе экспозиции (а) и участок спектра (б) с аналитической линией Ce 459,393 нм

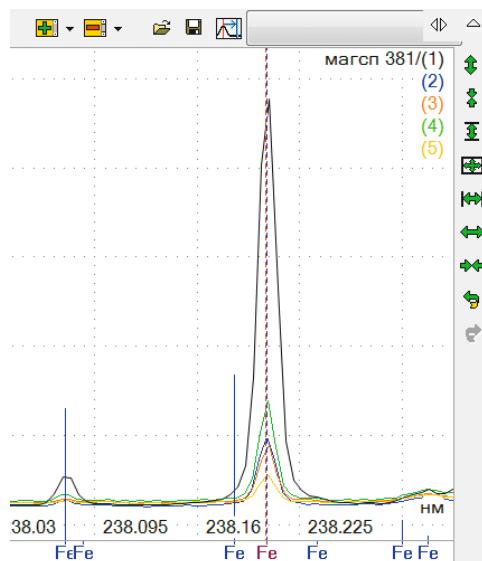


Рис. 9. Пять измерений участка спектра ГСО 381

Для примера рассмотрим участок спектра ГСО 381 с аттестованным содержанием железа 0,0017 % масс. (рис. 9). Все спектры были сняты после анализа образца стали и чистки штатива. Наблюдается закономерное снижение интенсивности линий железа до ожидаемого значения для аттестованного содержания (пятое параллельное измерение). При аккуратном подходе к подготовке проб и получению спектров удается построить градуировочный график для определения железа от 0,001 % масс. (рис. 10).

Для определения алюминия в диапазоне содержаний 0,003 – 10 % масс. используют две аналитические линии 176,325 и 394,4 нм (рис. 11).

Наличие повышенного количества «разбегающихся» точек на графиках говорит о важности подготовки поверхности проб и искрового штатива, чистки проти-

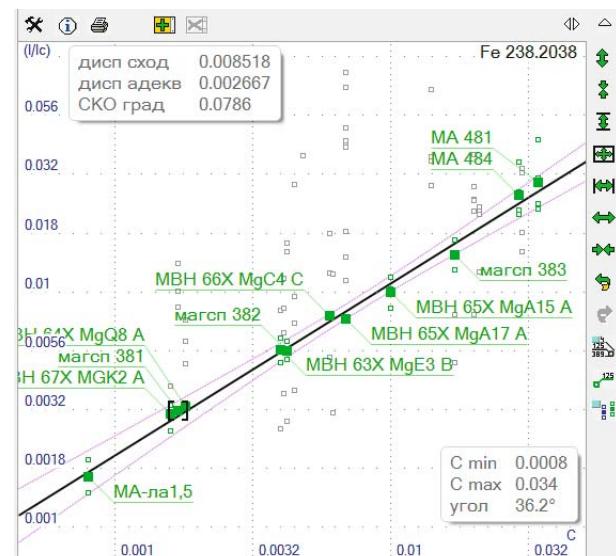


Рис. 10. Градуировочный график для определения железа по аналитической линии 238,204 нм

воэлектрода и применения отдельной щеточки при работе с магниевыми сплавами.

Влияние редкоземельных металлов на прочностные характеристики и теплостойкость сплавов на основе магния всесторонне изучается достаточно давно [12, 17]. Для получения магниевых сплавов с заданными свойствами важно знать концентрации легирующих элементов. С целью построения графиков для определения редкоземельных элементов (неодима, иттрия, лантана, церия) были использованы образцы иностранного и российского производства разных размеров. На рис. 12 показано хорошее согласие между образцами с аттестованными содержаниями. Анализические линии и линии сравнения большей частью

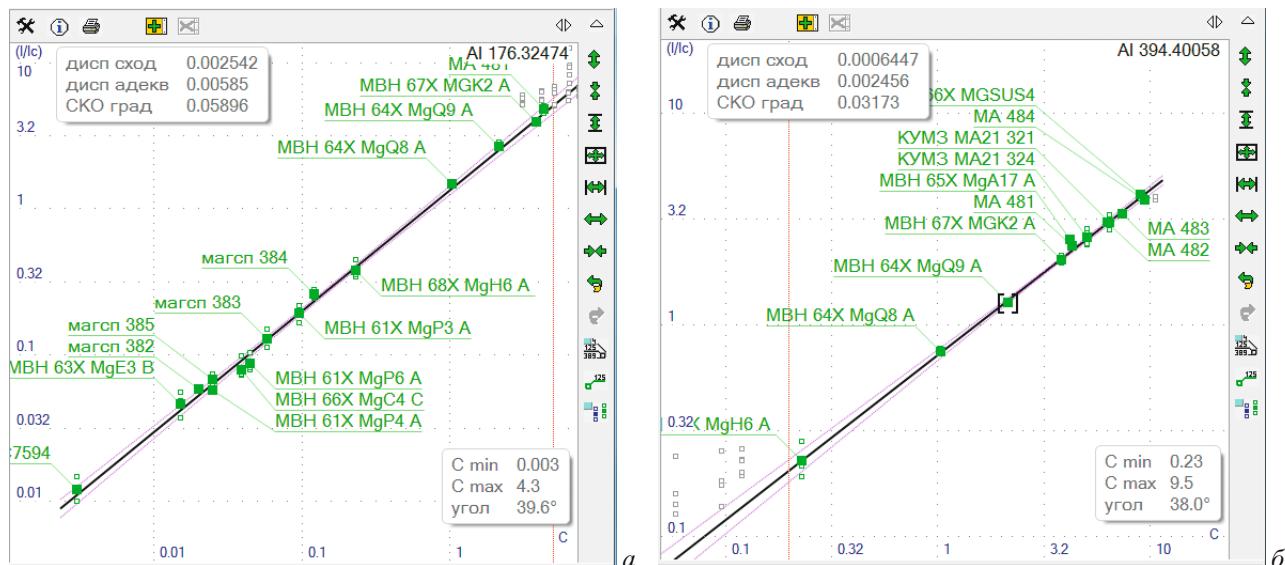


Рис. 11. Градуировочные графики для определения алюминия по двум аналитическим линиям — 176,325 (а) и 394,4 нм (б) с «перекрытием» по концентрациям в районе 1 % масс.



Рис. 12. Градуировочные графики для определения редкоземельных элементов: неодима (а), иттрия (б), церия (в) и лантана (г)

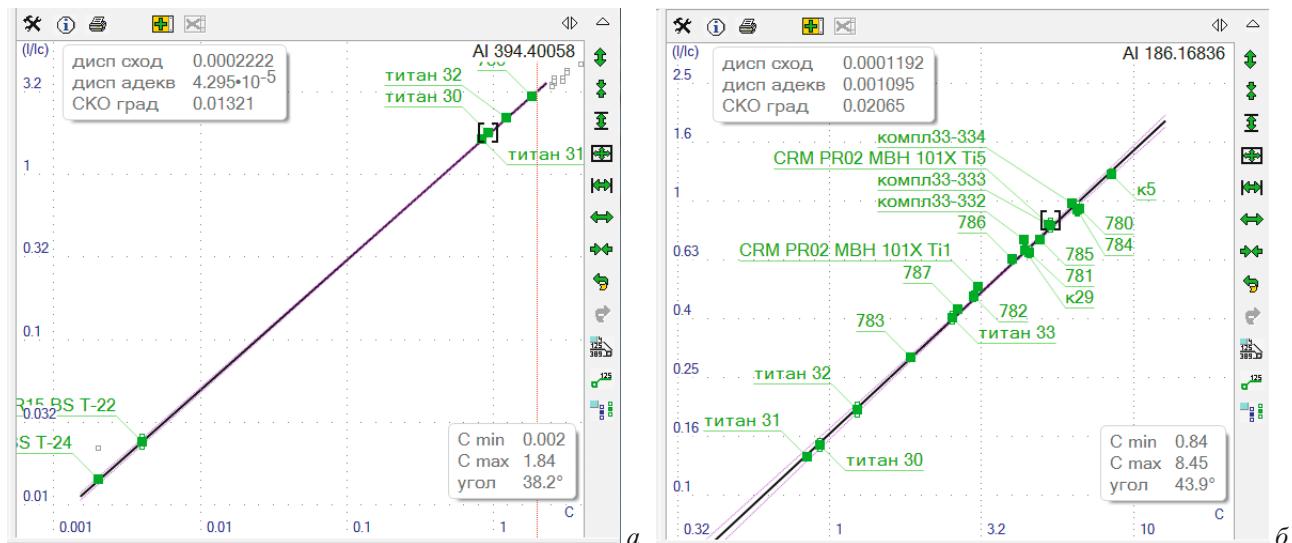


Рис. 13. Градуировочные графики для определения алюминия в титановых сплавах: *а* — при низких и средних концентрациях по аналитической линии 394,4 нм; *б* — при концентрациях до 10 % по линии 186,17 нм

Таблица 3. Проверка долговременной сходимости результатов определения алюминия в титане

Проба	C , % масс.	Время измерения (число.месяц, ч:мин)	\bar{C} , % масс.	ОСКО, %	Допуск
781	4,52 4,34 4,47 4,29 4,22	28.08, 20:37 28.08, 20:38 09.09, 9:45 09.09, 9:46	4,3	2,5	$0,25 < 0,42$
783	1,84 1,84 1,84 1,80 1,87	28.08, 20:33 28.08, 20:34 09.09, 9:47 09.09, 9:48	1,8	1,4	$0,06 < 0,8$
787	2,64 2,75 2,75 2,67 2,74	28.08, 20:30 28.08, 20:31 09.09, 9:49 09.09, 9:50	2,7	1,4	$0,08 < 0,27$
101X Ti5	5,33 5,40 5,36 5,21 5,59	28.08, 21:00 28.08, 21:01 09.09, 9:51 09.09, 9:52	5,4	2,9	$0,39 < 0,53$
Титан 30	0,93 0,91 0,88 0,89 0,93	28.08, 20:49 28.08, 20:53 09.09, 9:50 09.09, 9:51	0,9	2,8	$0,56 < 0,88$
Титан 32	1,23 1,19 1,26 1,22 1,15	28.08, 20:51 28.08, 20:55 09.09, 10:01 09.09, 10:07	1,2	3,6	$0,10 < 0,12$

расположены в рабочем диапазоне воздушного полихроматора 350 – 700 нм.

Особенности определения состава титановых сплавов

Плохая теплопроводность титана за счет ускоренного прогрева материала пробы в районе пятна обыскривания позволяет сократить время предварительного обжига и начинать измерение (накопление экспозиции) через 6 с после начала обыскривания. В таком режиме за одну минуту можно легко провести два параллельных измерения. Сокращение времени позволяет уменьшить эрозию поверхности и загрязнение штатива материалом пробы.

При выборе аналитических линий алюминия (рис. 13) были проверены несколько участков спектров (рис. 14). Лучшие аналитические линии без уширений и наложений находятся в вакуумном ультрафиолете около 176 и 185 нм. Остальные участки заполнены мешающими линиями титана или содержат слишком широкие и яркие для определения высоких концентраций линии алюминия.

Для проверки долговременной стабильности градуировочных характеристик спектры ряда стандартных образцов повторно зарегистрировали через несколько дней. В табл. 3 представлены результаты контроля измерений. Из представленных данных следует хорошая согласованность с требованиями ГОСТ 23902–79 [5], в котором нормируется допустимое расхождение для таких концентраций по формуле $(X_{\max} - X_{\min}) \leq 3S_r X_{\text{ср}}$ ($S_r = 0,03$ для фотоэлектрических измерений в рассматриваемом диапазоне концентраций).

Аналогичным образом построены градуировочные графики для других определяемых элементов, например Zr и Fe (рис. 15). Большое число спектральных линий титана позволяет довольно легко выбрать

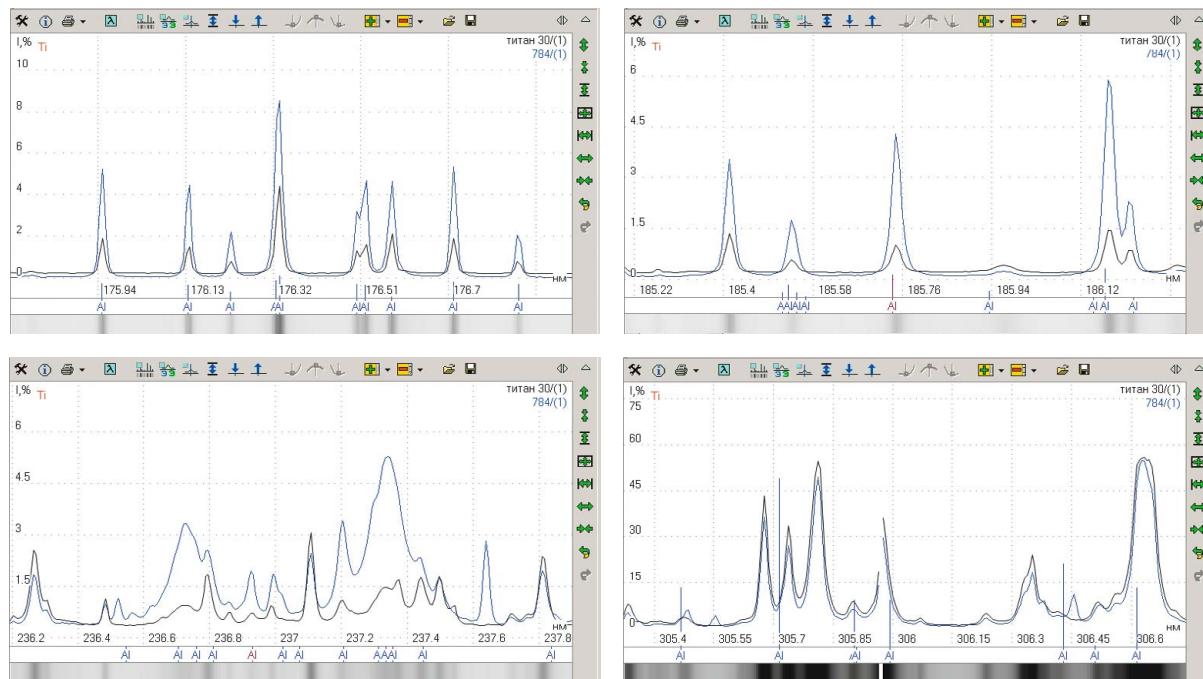


Рис. 14. Участки спектра образца, содержащего 1 и 6,5 % масс. алюминия (синим цветом линии обозначен спектр пробы с более высоким содержанием алюминия)

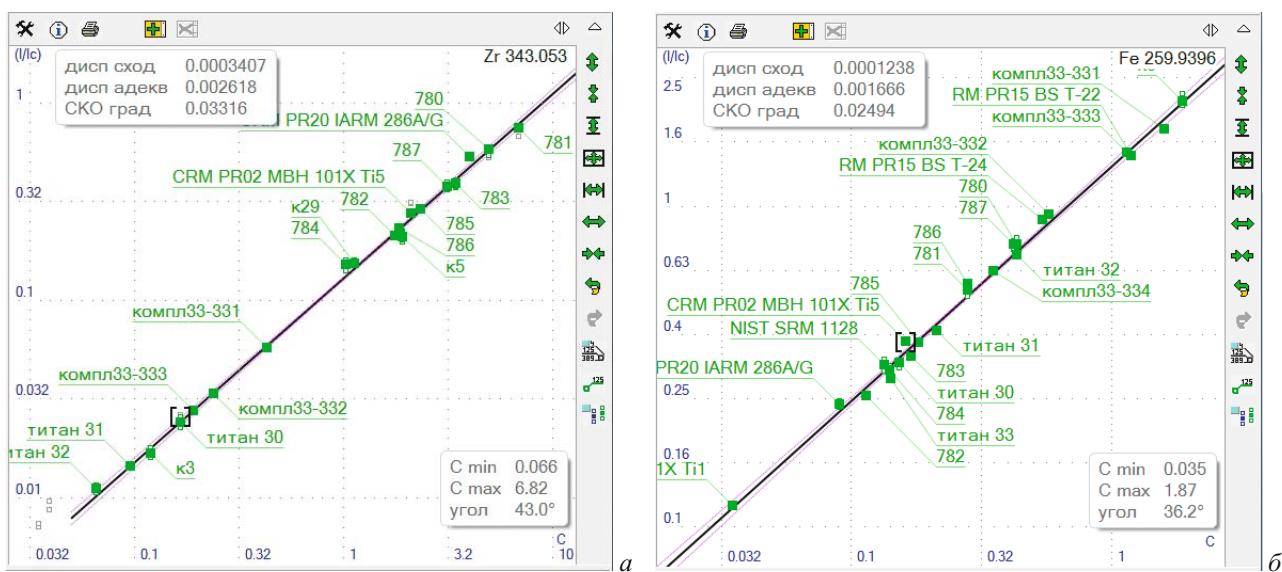


Рис. 15. Градуировочные графики для определения Zr по линии 343,053 нм (а) и Fe по линии 259,94 нм (б) во всем рабочем диапазоне концентраций

линии сравнения для всех аналитических линий определяемых элементов.

Таким образом, найдены устойчивые градиуровочные зависимости для всех определяемых элементов в сплавах на основе титана, алюминия и магния с использованием спектрометра «Гранд-Эксперт». Сокращение времени искрового разряда позволило при сохранении качества результатов уменьшить эрозию исследуемых материалов и расход образцов сравнения.

По сравнению с предыдущими результатами было проведено расширение диапазонов концентраций

основных легирующих элементов до рабочих. Показано, что при условии однородности состава проб спектрометр «Гранд-Эксперт» может решить задачу одновременного определения примесных и легирующих элементов за несколько минут даже в сложнолегированных жаропрочных сплавах на основе алюминия и титана в пробах разных форм и размеров.

При выбранных условиях анализа средний расход аргона на получение одного спектра составил от 1 до 1,5 л в зависимости от материала основы. С учетом увеличенного периода контроля градуировки и проведения двух параллельных измерений для каждой

пробы стандартного баллона аргона (40 л) хватает для проведения до 2500 определений с производительностью до 25 – 35 проб в час.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Буравлев Ю. М.** Атомно-эмиссионная спектрометрия металлов и сплавов. — Донецк: ДонГУ, 2000. — 437 с.
2. **Мосичев В. И., Николаев Г. И., Калинин Б. Д. и др.** Металлы и сплавы. Анализ и исследование. Методы атомной спектроскопии. Атомно-эмиссионный, атомно-абсорбционный и рентгенофлуоресцентный анализ. Т. 2. — СПб.: НПО «Профессионал», 2006. — 716 с.
3. ГОСТ 3221–85. Алюминий первичный. Методы спектрального анализа. — М.: ИПК «Изд-во стандартов», 1998.
4. ГОСТ 7727–81. Сплавы алюминиевые. Методы спектрального анализа. — М.: ИПК «Изд-во стандартов», 1997.
5. ГОСТ 23902–79. Сплавы титановые. Методы спектрального анализа. — М.: ИПК «Изд-во стандартов», 1988.
6. ГОСТ 7728–79. Сплавы магниевые. Методы спектрального анализа. — М.: ИПК «Изд-во стандартов», 1998.
7. **Гуреева М. А. и др.** Свариваемые алюминиевые сплавы в конструкциях транспортных средств / Заготовительные производства в машиностроении. 2009. № 3. С. 11 – 21.
8. **Колобнев Н. И.** Алюминиево-литиевые сплавы со скандием / Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 7. С. 30 – 32.
9. **Муравьев В. И., Якимов В. И., Хосен Ри и др.** Изготовление литых заготовок в авиастроении. — Владивосток: Дальнаука, 2003. — 616 с.
10. **Ильин А. А., Колачев Б. А., Полькин И. С.** Титановые сплавы. Состав, структура, свойства / М.: ВИЛС — МАТИ, 2009. — 520 с.
11. **Белов Н. А., Алабин А. Н.** Перспективные алюминиевые сплавы с повышенной жаропрочностью для арматуростроения как возможная альтернатива сталим и чугунам / Арматуростроение. 2010. Т. 2(65). С. 50 – 54.
12. **Рохлин Л. Л.** Исследования магниевых и алюминиевых сплавов, содержащих редкоземельные металлы, в Институте металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН / Цветные металлы. 2011. № 5.
13. **Горынин И. В., Ушков С. С., Хатунцев А. Н., Лошакова Н. И.** Титановые сплавы для морской техники / СПб.: Политехника, 2007. — 387 с.
14. **Дождикова Л. Н., Файзуллина А. М., Патрушева И. Г.** Атомно-эмиссионный спектральный анализ магниевых сплавов на квантотметре МФС-8 с анализатором МАЭС и источником возбуждения спектров «ВЕЗУВИЙ-2» / Материалы VII Международного симпозиума «Применение анализаторов МАЭС в промышленности». 2006. С. 83 – 84.
15. **Лабусов В. А., Путынаков А. Н., Зарубин И. А., Гаранин В. Г.** Новые многоканальные оптические спектрометры на основе анализаторов МАЭС / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 1. Ч. II. С. 7 – 13.
16. **Гаранин В. Г., Зарубин И. А., Лабусов В. А. и др.** Определение состава металлов и сплавов на вакуумном атомно-эмиссионном спектрометре «Гранд-Эксперт» / Материалы XIII Международного симпозиума «Применение анализаторов МАЭС в промышленности». 2013. С. 101 – 113.
17. **Савицкий Е. М.** Редкоземельные металлы и перспективы их использования в промышленности / Вестник АН СССР. 1960. № 6. С. 81 – 88.