АНАЛИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ НА ЭМИССИОННЫХ СПЕКТРОМЕТРАХ С НИЗКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ.

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ "ТРЕТЬИХ" ЭЛЕМЕНТОВ

Е.В.Горский, к.т.н., **А.М.Лившиц**, к.т.н.,
ИСАН, ООО "НПО "Спектроприбор",
info@sp-pribor.ru

УДК 543.423.1; ВАК 05.11.00

Рассмотрена методика учета влияния "третьих" элементов при анализе алюминиевых сплавов и высоколегированных сталей с использованием эмиссионных спектрометров низкого оптического разрешения с искровым возбуждением спектров. Приведены результаты расчетов аддитивных и мультипликативных коэффициентов влияний для анализируемых элементов. Показано, что применение регрессионных методов обработки результатов анализа позволяет существенно снизить погрешность определения элементов в рассмотренных группах сплавов.

В современных заводских лабораториях для контроля состава металлических сплавов широко используется атомный эмиссионный спектральный анализ [1, 2], развитие оборудования для которого идет в основном по двум направлениям. С одной стороны, разрабатываются спектрометры с высокой чувствительностью к регистрируемому излучению, которые предназначены для точного анализа состава сплавов, включая малые примеси химических элементов. В первую очередь, это достигается созданием стабильных и интенсивных источников излучения. Также используются оптические блоки со сравнительно высокой дисперсией (1 нм/мм и выше), позволяющей максимально разносить в пространстве близко лежащие спектральные линии, чтобы снижать влияние разных химических элементов на результаты измерения концентраций. При этом уменьшается уровень рассеянного света, но одновременно увеличиваются габариты и стоимость приборов.

Второе направление развития рынка эмиссионных спектрометров связано с созданием малогабаритных и недорогих приборов со сравнительно невысокой дисперсией и более простыми источниками возбуждения спектра. Такое оборудование пользуется стабильным спросом у потребителей, однако имеет ряд недостатков. На результатах измерений сказываются следующие факторы: влияние "третьих" элементов из-за наложения спектральных эмиссионных линий друг на друга, неравномерное поступление составляющих компонентов в область разряда, реабсорбция аналитических спектральных линий и т. д. [3].

При измерениях концентраций наибольшие искажения вносят, как правило, входящие в состав сплава так называемые третьи элементы. Для учета их влияния в эмиссионных спектрометрах давно и успешно применяют математические регрессионные методы [4], реализованные в программном обеспечении (ПО) приборов. Например, серия спектрометров ПАПУАС-4 (дисперсия 1,5 нм/мм) снабжена ПО, в котором применяется математический способ коррекции искажений спектров при обработке результатов анализа алюминиевых [5], медных [6], никелевых сплавов [7], а также высоколегированных сталей [8]. Эксплуатация спектрометров в реальных производственных условиях показала эффективность применения таких методов.

Однако в спектрометрах с низкой дисперсией из-за более сильного наложения спектральных линий могут возникнуть ограничения. Целью настоящей работы стало изучение возможности применения регрессионных методов учета влияния "третьих" элементов в спектрометре со сравнительно низкой дисперсией (4–5 нм/мм).

Для выполнения поставленной задачи был разработан и собран макет спектрометра на базе вогнутой дифракционной решетки с регистрацией спектра при помощи ПЗС-линейки [9]. Для возбуждения спектров использовался высоковольтный искровой разряд в воздушной среде (табл.1).

Исследование проводили для металлических сплавов на основе алюминия и железа. Для алюминиевых сплавов использовали образцы четырех комплектов стандартных образцов: 18 (марка АМГ), 23 (марка АК12),

Таблица 1. Основные характеристики спектрометра

Характеристика	Значение
Рабочий спектральный диапазон	200–350 нм
Спектральное разрешение	0,27 нм
Обратная линейная дисперсия	4,5 нм/мм
Частота штрихов дифракционной решетки	600 штрихов/мм
Приемник излучения	ПЗС-линейка
Размер и число элементов ПЗС	8×200 мкм, 3768 шт.
Источник возбуждения	Высоковольтная искра, напряжение 8–12 кВ, частота 200–400 Гц

207 (марка АК5М2) и VSA1 (первичный алюминий). Для железных сплавов использовали образцы двух комплектов высоколегированных сталей: 31 (марка X12H20T3p) и 36 (марка X12M). Были изучены эмиссионные спектры сплавов, и для каждого химического элемента выбраны аналитические линии, максимально свободные от наложения пиков других аналитов. В табл.2 и 3 представлены длины волн, используемые в методиках определения состава алюминиевых сплавов и высоколегированных сталей: λ_1 и λ_2 – длины волн аналитической линии и соответствующей линии срав-

нения, а E_1 и E_2 – потенциалы их возбуждения в электрон-вольтах, соответственно.

Алгоритм расчета с учетом влияний "третьих" элементов состоит из ряда шагов [5]. Пусть для некоторого набора стандартных образцов получены относительные интенсивности аналитических линий. Для расчета концентрации элемента используется формула:

$$C_p = \sum_j a_j R^j + \sum_a k_a C_a + \sum_m k_m R C_m,$$

где C_p – расчетная концентрация элемента, R^j – относительная интенсивность линии; a_j – базовые коэффициенты, которые получаются по методу наименьших квадратов при расчете концентрационной кривой (зависимость паспортной концентрации от интенсивности), без учета влияний. В применяемом программном обеспечении для задания этой кривой используются многочлены степени не выше третьей ($j=1, 2, 3$).

Следующие коэффициенты k_a отвечают за так называемые аддитивные влияния, зависящие только от концентрации влияющего элемента. Обычно эти влияния вызваны наложением спектральной линии элемента на аналитическую линию, либо на участок, где определяется ее фон. Здесь C_a – концентрация соответствующего влияющего элемента.

Последний член в формуле описывает так называемые мультипликативные влияния с коэффициентами k_m , которые зависят от произведения концентраций влияющего элемента и анализируемого. Когда есть взаимное влияние элементов, для

Таблица 2. Спектральные линии и потенциалы возбуждения для определения состава алюминиевых сплавов

Элемент	λ_1 , нм	λ_2 , нм	E_1 , эВ	E_2 , эВ
Fe	259,940	256,798	4,77	4,83
Ti	334,940	308,215	3,74	4,02
Cr	267,716		6,18	
Mn	294,921		5,37	
Si	288,158		5,08	
V	318,398		3,90	
Ni	341,477		3,65	
Cu	324,754		3,82	
Mg	293,654		8,65	
Zn	334,502		7,78	

Таблица 3. Спектральные линии и потенциалы возбуждения для определения состава высоколегированных сталей

Элемент	λ_1 , нм	λ_2 , нм	E_1 , эВ	E_2 , эВ
Ni	341,477	239,562	3,65	5,22
Cr	205,559		6,03	
Mn	293,306		5,41	
Al	308,215	259,940	4,02	4,77
Ti	337,279		3,68	
Si	288,158		5,08	
V	318,398		3,90	

Таблица 4. Расчетные параметры влияний в методике анализа состава алюминиевых сплавов

Элемент	λ_1/λ_2	Аддитивно влияющие элементы – k_a	Мультипликативно влияющие элементы – k_m
Ti	334,940/308,215	Mn-0,00119 Mg-0,002504	
Fe	259,940/256,798	Si-0,0141	
Cr	267,617/308,215		Ni-0,1373
Mn	294,921/308,215		Si-0,0007072
Si	288,158/308,215	Fe-0,0969 Cu-0,3687 Zn-0,2085	Zn-0,005384
V	318,398/308,215	Cr-0,1185	
Ni	341,477/308,215	Ti-0,129 Mn-0,03406	Fe-0,1527
Cu	324,554/308,215		
Mg	293,654/308,215		Mn-0,006567
Zn	334,502/308,215	Ni-0,6044	Ni-0,2084

Таблица 5. Расчетные параметры влияний в методике анализа состава высоколегированных сталей

Элемент	λ_1/λ_2	Аддитивно влияющие элементы – k_a	Мультипликативно влияющие элементы – k_m
Ni	341,477/239,562		Ti-1,29
Cr	205,559/239,562	Ni-0,4497	Ni-0,05875
Al	308,215/259,940	Ti-0,2022	
Mn	293,306/239,562	Ni-0,01354	Ni-0,0004712
Ti	337,279/259,940		Cr-0,006407
Si	288,158/259,940	Ni-0,03703	Cr-0,03825
V	318,398/259,940	Cr-0,07218

Рис.1. Корреляция паспортных и расчетных концентраций без учета (а) и с учетом (б) влияний для линии магния Mg293,654 нм/Al308,215 нм в алюминиевых сплавах

Рис.2. Корреляция паспортных и расчетных концентраций без учета (а) и с учетом (б) влияний для линии марганца $Mn293,306 \text{ нм}/Fe239,562 \text{ нм}$ в высоколегированных сталях

корректной работы алгоритма расчета вместо концентрации анализируемого аналита берется интенсивность его аналитической линии. Коэффициенты в программе вычисляются итерационным методом.

Следует отметить, что к вычислению коэффициентов влияний нужно подходить с особой осторожностью и не использовать "лишние", потому что можно получить такую регрессионную модель, в которой случайные отклонения измерений учтены как систематические влияния. Кроме того, при достаточном количестве исходных данных система становится "переопределенной", когда точно рассчитаны значения концентраций в некотором небольшом диапазоне,

а вне его есть риск получить абсолютно недостоверные результаты.

В результате выполненных экспериментов были определены химические элементы, вносящие заметный вклад в качестве влияющих "третьих" элементов на результаты спектрального анализа, проводимого на используемой модели спектрометра. В табл.4 и 5 представлены рассчитанные регрессионным методом аддитивные и мультипликативные коэффициенты влияний для анализируемых элементов в алюминиевых сплавах и высоколегированных сталях.

Представленные результаты показывают, что в используемом спектрометре с низкой дисперсией заметно воз-

РЕКЛАМА

росло количество аддитивно влияющих "третьих" элементов по сравнению с приборами с дисперсией 1,5 нм/мм [5].

На рис.1 в качестве примера приведены графики соответствия расчетных и паспортных концентраций без учета и с учетом рассчитанных влияний для линии магния Mg 293,654 нм/Al 308,215 нм в алюминиевых сплавах, а на рис.2 – аналогичные зависимости для линии марганца Mn 293,306 нм/Fe 239,562 нм в высоколегированных сталях.

Дальнейшая практическая проверка разработанных методик показала, что их успешно можно применять для сплавов, близких исследованным по составу. Это сужает область использования регрессионных методов для спектрометров со сравнительно низкой дисперсией. Однако для контроля плавов на предприятиях, где, как правило, производится ограниченное число сплавов, рассматриваемый спектрометр, использующий регрессионные методы учета влияний, может найти широкое практическое применение.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Буравлев Ю.М.** Атомно-эмиссионная спектроскопия металлов и сплавов. – ДонНУ, 2000. 437 с.
2. **Thomsen V.B.** E. Modern Spectrochemical Analysis of Metals. – Ohio: ASM International, 1996. 204 p.
3. **Буравлев Ю.М.** Влияние состава и размера пробы на результаты спектрального анализа сплавов. – Киев; Техника, 1970. 212 с.
4. **Орлов А.Г.** Методы расчета в количественном спектральном анализе. – Л.: Недра, 1977. 108 с.
5. **Горский Е.В., Лившиц А.М., Пелезнев А.В.** Учет влияния "третьих" элементов при анализе алюминиевых сплавов на спектрометре ПАПУАС-4 // Заводская лаборатория. 2006. №3. С. 11–15.
6. **Горский Е.В., Лившиц А.М., Пелезнев А.В.** Особенности использования эмиссионного спектрометра ПАПУАС-4ИМ при анализе медных сплавов // Заводская лаборатория. 2007. №5. С. 25–27.
7. **Лившиц А.М., Горский Е.В., Маврин Н.Б., Палкин Ю.А.** Особенности анализа никелевых сплавов с использованием эмиссионного спектрометра ПАПУАС-4 // Контроль. Диагностика. 2011. № 10. С. 55–58.
8. **Горский Е.В., Лившиц А.М.** Учет межэлементных влияний при анализе высоколегированных сталей на эмиссионном спектрометре ПАПУАС-4 // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. 83(2). С. 26–30.
9. **Holst G.C., Lomheim T.S.** CMOS/CCD sensors and camera systems // J.C. Publishing. 2011. 335 p.

Вышел в свет очередной выпуск журнала "Журнал аналитической химии" (2018, Том 73, № 2 ISSN: 0044-4502).

Читайте в номере:

Платонов И.А., Родинков О.В., Горбачева А.Р., Москвин Л.Н., Колесниченко И.Н.
Методы и средства приготовления стандартных газовых смесей

Савинов С.С., Будаева Р.М., Дробышев А.И.
Атомно-эмиссионный анализ ногтей человека на содержание микроэлементов

Ананьева И.А., Полякова Я.А., Шаповалова Е.Н., Мажуга А.Г., Шпигун О.А.
Разделение энантиомеров-блокаторов на силикагеле, модифицированном наночастицами золота с иммобилизованным макроциклическим антибиотиком ванкомицином

Паутова А.К., Бедова А.Ю., Саршор Ю.Н., Белобородова Н.В.
Определение ароматических микробных метаболитов в сыворотке крови методом газовой хромато-масс-спектрометрии

Шайдарова Л.Г., Челнокова И.А., Лексина Ю.А., Ильина М.А., Гедмина А.В., Будников Г.К.
Проточно-инжекционное амперометрическое определение дофы и тирозина на двойном электроде, модифицированном бинарной системой золото-кобальт

Дейнека В.И., Макаревич С.Л., Дейнека Л.А.

Гидрофильная хроматография на силикагеле: групповой анализ антоцианов плодов винограда

Титаренко В.О., Халафян А.А., Темердашев З.А., Каунова А.А., Абакумов А.Г.
Идентификация сортовой и региональной принадлежности красных вин методами классификационного анализа

Надеждинский А.И., Понуровский Я.Я.
Работы по аналитическому использованию диодной лазерной спектроскопии в институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН

Золотов Ю.А., Бучаченко А.Л.
От квантовых струн до тайн мышления... Экскурсы по самым завораживающим вопросам физики, химии, биологии, математики

ANALYSIS OF METAL ALLOYS ON LOW-RESOLUTION EMISSION SPECTROMETERS.

CORRECTION OF INTER-ELEMENT EFFECTS

E.V.Gorsky, A.M.Livshits, Institute of Spectroscopy
of the Russian Academy of Sciences, NPO Spectropribor LLC
info@sp-pribor.ru

A technique for correction of the influence of third components in analysing aluminium alloys and high-alloy steels with the use of low-resolution emission spectrometers with spark excitation is considered. The results of the calculation of additive and multiplicative coefficients of influence for analysed elements are presented. It is shown that the use of regression methods for processing of the analysis results makes it possible to significantly reduce the errors in determining the contents of elements in the considered groups of alloys.

In up-to-date factory laboratories, atomic emission spectral analysis is widely used to control the composition of metal alloys [1, 2], the equipment for which is mainly developed in two directions. The first one is the development of spectrometers with high resolution and high sensitivity to the detected radiation, which are intended for an accurate analysis of the composition of alloys including small admixtures of chemical elements. This is mainly achieved by utilization of stable and intensive sources of excitation. Spectral units with a relatively high dispersion (less than 1 nm/mm) are used, which enables to resolve close-lying spectral lines in order to reduce the influence of various chemical elements on the measurement results. At the same time, the amount of scattered light is reduced but the dimensions and cost of the devices increase.

The second direction for the emission spectrometer market development is associated with the creation of small and inexpensive devices with a relatively low dispersion and simpler excitation sources. Such equipment is highly demanded by customers although has a number of shortcomings. The following factors have an impact on the measurement results: inter-elements influences due to the overlapping of spectral emission lines on each other, the uneven supply of constituent components to the discharge region, the reabsorption of analytical spectral lines etc. [3].

Usually the main reason for errors in concentration determination are so called third component influences. To

compensate for these influences in emission spectroscopy, mathematical regression methods [4] implemented in the software of devices have been widely used. For example, a series of PAPUAS-4 spectrometers (dispersion 1.5 nm/mm) is equipped with software that uses a mathematical methods for correcting the inter-elements effect when processing the results of analysis of aluminium [5], copper [6] and nickel alloys [7] as well as high-alloy steels [8]. The operation of spectrometers in factory environment conditions has shown the effectiveness of such methods.

In the meantime, low-dispersion spectrometers may face limitations due to a stronger overlap of the spectral lines. The purpose of the research was to consider the possibility of applying regression methods for correction of inter-element effect in a spectrometer with a relatively low dispersion (4–5 nm/mm).

To accomplish the task, a spectrometer mock-up based on a concave diffraction grating with spectrum registration by means of linear CCD array [9] was developed and assembled. To excite the spectra, a high-voltage spark discharge was used in the air atmosphere (Table 1).

The research was made for alloys based on aluminium and high-alloyed steel. For the aluminium alloys, the samples of four sets of standard samples were used: 18 (AMG grade), 23 (AK12 grade), 207 (AK5M2 grade) and VSA1 (primary aluminium). For steel alloys, the samples of two sets of high-alloy steels were used: 31 (grade X12H20T3p) and 36 (grade X12m). The emission spectra of the alloys

Table 1. Key performance of the spectrometer

Specifications	Value
Operating spectral range	200–350 nm
Spectral resolution	0.27 nm
Inverse linear dispersion	4.5 nm/mm
Diffraction grating density	600 lines/mm
Radiation detector	Linear CCD array
Size and number of CCD elements	8 × 200 μm, 3768 pixels
Source of excitation	High-voltage spark Voltage 8–12 kV, frequency 200–400 Hz

were studied, and for each chemical element analytical lines, which are maximally free from overlapping peaks of other analytes, were chosen. Tables 2 and 3 show the wavelengths used in the methods for determining the composition of aluminium alloys and high-alloy steels: λ_1 and λ_2 are the wavelengths of the analytical line and the corresponding comparison line, and E_1 and E_2 are their excitation potentials in electron-volts, respectively.

The algorithm of data processing of the correction of inter-element effects consisted of a number of steps [5]. Let the relative intensities of the analytical lines be obtained

for a certain set of standard samples. To calculate the concentration of an element, the formula below was used:

$$C_p = \sum_j a_j R_j + \sum_a k_a C_a + \sum_m k_m R C_m,$$

where C_p is the concentration of the element p being investigated, R_j is the relative intensity of the line; a_j are the so-called basic coefficients that are obtained by the least square method in calculating the concentration curve (the dependence of the rated concentration on the intensity) without taking into account the inter-element effects. In the software used to determine this basic curve, polynomials of a degree no higher than the third one are used ($j=1, 2, 3$).

The following coefficients k_a are responsible for the so-called additive effects depending on the concentration of the influencing element only. Usually, these effects are caused by the imposition of the spectral line of the influencing element on the analytical line, or on the site where its background level is determined. Here, C_a is the concentration of the corresponding influencing element.

The last term in the formula describes the so-called multiplicative effects with the k_m coefficients which depend on the product of the concentrations of the influencing element and the analysed one. When there is a mutual influence of elements, for the correct operation of the calculation algorithm, instead of the concentration of the analysed element, the intensity of its analytical line is considered. Coefficients in the software are calculated by the iterative procedure.

It should be noted that special care should be taken in the calculation of the coefficients of influence without using any 'excess' ones because it is possible to obtain a regression model in which random deviations of measurements are taken into

Table 2. Spectral lines and excitation potentials for determining the composition of aluminium alloys

Element	λ_1 , nm	λ_2 , nm	E_1 , eV	E_2 , eV
Fe	259.940	256.798	4.77	4.83
Ti	334.940	308.215	3.74	4.02
Cr	267.716		6.18	
Mn	294.921		5.37	
Si	288.158		5.08	
V	318.398		3.90	
Ni	341.477		3.65	
Cu	324.754		3.82	
Mg	293.654		8.65	
Zn	334.502		7.78	

Table 3. Spectral lines and excitation potentials for determining the composition of high-alloy steels

Element	λ_1 , nm	λ_2 , nm	E_1 , eV	E_2 , eV
Ni	341.477	239.562	3.65	5.22
Cr	205.559		6.03	
Mn	293.306		5.41	
Al	308.215	259.940	4.02	4.77
Ti	337.279		3.68	
Si	288.158		5.08	
V	318.398		3.90	

Table 4. The model parameters for analysis the composition of aluminium alloys

Element	λ_1/λ_2	Additively influencing elements – k_a	Multiplicatively influencing elements – k_m
Ti	334.940/308.215	Mn-0.00119 Mg-0.002504	
Fe	259.940/256.798	Si-0.0141	
Cr	267.617/308.215		Ni-0.1373
Mn	294.921/308.215		Si-0.0007072
Si	288.158/308.215	Fe-0.0969 Cu-0.3687 Zn-0.2085	Zn-0.005384
V	318.398/308.215	Cr-0.1185	
Ni	341.477/308.215	Ti-0.129 Mn-0.03406	Fe-0.1527
Cu	324.554/308.215		
Mg	293.654/308.215		Mn-0.006567
Zn	334.502/308.215	Ni-0.6044	Ni-0.2084

Table 5. The model parameters for analysis the composition of high-alloy steels

Element	λ_1/λ_2	Additively influencing elements – k_a	Multiplicatively influencing elements – k_m
Ni	341.477/239.562		Ti-1.29
Cr	205.559/239.562	Ni-0.4497	Ni-0.05875
Al	308.215/259.940	Ti-0.2022	
Mn	293.306/239.562	Ni-0.01354	Ni-0.0004712
Ti	337.279/259.940		Cr-0.006407
Si	288.158/259.940	Ni-0.03703	Cr-0.03825
V	318.398/259.940	Cr-0.07218

Fig.1. Correlation of the certified and calculated concentrations without correction (a) and with correction (b) of inter-element effects for the magnesium line Mg 293.654 nm/Al 308.215 nm in aluminium alloys

Fig.2. Correlation of the certified and calculated concentrations without correction (a) and with correction (b) of inter-element effects for the manganese line Mn 293.306 nm/Fe 239.562 nm in high-alloy steels

account as systematic influences. In addition, with sufficient initial data, the system becomes overdetermined so the concentration values are accurately calculated in a certain small range, and if outside, there is the risk of obtaining unpredictable results.

As a result of the performed experiments, chemical elements which make a significant influence on the results of the analysis were identified. Tables 4 and 5 show the additive and multiplicative coefficients of influence calculated with a regression methods for the analysed elements in aluminium alloys and high-alloy steels.

The presented results show that in the used spectrometer with low dispersion, the amount of additively influencing elements has significantly increased in comparison with devices with a higher dispersion of 1.5 nm/mm [5].

In Fig.1 as an example, a comparison of the certified and determined concentrations is given without correction (a) and with correction (b) of inter-element effects for the magnesium line Mg 293.654 nm/Al 308.215 nm in aluminium alloys, and Fig.2 presents similar dependences for the manganese line Mn 293.306 nm/Fe 239.562 nm in high-alloy steels.

Practical verification of the developed methods has shown that they can be successfully used for alloys that are close to those investigated by composition. This limits the scope of regression methods for spectrometers with comparatively low dispersion. However, for quality control in factories, in which a limited number of alloys are usually produced, considered spectrometer which uses regression methods for correction, can become in common use.

REFERENCES

1. **Buravlev Yu.M.** Atomic emission spectroscopy of metals and alloys. DonNU. 2000. 437 p.
2. **Thomsen V.B.E.** Modern spectrochemical analysis of metals. Ohio: ASM International, 1996. 204 p.
3. **Buravlev Yu.M.** The effects of sample composition and size on the results of spectral analysis of alloys. Kiev. Tekhnika. 1970. 212 p.
4. **Orlov A.G.** Calculation methods in quantitative spectral analysis. Leningrad. Nedra. 1977. 108 p.
5. **Gorsky E.V., Livshits A.M., Peleznev A.V.** Accounting for the Influence of the 'Third' Elements in the analysis of aluminium alloys on the PAPUAS-4 spectrometer // Factory Laboratory. 2006. No 3. P. 11–15.
6. **Gorsky E.V., Livshits A.M., Peleznev A.V.** Features of the use of the emission spectrometer PAPUAS-4IM in the analysis of copper alloys // Factory Lab. 2007. No 5. P. 25–27.
7. **Livshits A.M., Gorsky E.V., Mavrin N.B., Palkin Yu.A.** Features of analysis of nickel alloys with the emission spectrometer PAPUAS-4 // Control. Diagnostics. 2011. No 10. P. 55–58.
8. **Gorsky E.V., Livshits A.M.** Accounting for inter-elemental influences in the analysis of high-alloy steels on the emission spectrometer PAPUAS-4 // Factory Laboratory. Material Diagnostics. 2017. 83 (2). P. 26–30.
9. **Holst G.C., Lomheim T.S.** CMOS/CCD sensors and camera systems // JC. Publishing / 2011. 335p.