

УДК: 549.2:546.831:546.82

РОЗРОБКА КОМПЛЕКСОНОМЕТРИЧНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ЦИРКОНІЮ У СПЛАВАХ НА ОСНОВІ ТИТАНУ VT-9, VT-20 ТА У ЦИРКОНОВОМУ КОНЦЕНТРАТІ

Синяєва Н.П., к.х.н., доцент, Омельянчик Л.О., д. фарм.н., проф.,
Бережна О.Ю., студент

Запорізький національний університет Україна, 69600, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 66

alen-berezhna@yandex.ru

Розроблено метод комплексонометричного визначення вмісту цирконію у сплавах на основі титану VT-9, VT-20 та цирконовому концентраті. Обґрунтована доцільність використання хімічних методів у поточному контролі якості титанових сплавів та цирконового концентрату.

В якості титранту для дослідження обрано динатрієву сіль етилендіамінтетраетанової кислоти (комплексонІІІ), індикатор-3,3-біс-ди (карбоксиметил)амінометил-0- крезолсульфоталеїн (ксиленоловий оранжевий).

Доведено, що цирконій з комплексом ІІІ при еквівалентному співвідношенні 1:1 утворює дуже міцний комплекс (константа стійкості комплексу цирконію - 29,5).

Правильність методу визначення вмісту цирконію доведена порівнянням з стандартизованим гравіметричним методом визначення.

Ключові слова: сплави на основі титану, цирконовий концентрат, цирконій, комплексонометричний метод, динатрієва сіль етилендіамінтетраетанової кислоти, ксиленоловий оранжевий, гравіметричний метод, стандартний зразок.

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСОНОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ЦИРКОНИЯ В СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ ТИТАНА VT-9, VT-20 И В ЦИРКОНОВОМ КОНЦЕНТРАТЕ

Синяева Н.П., Омельянчик Л.А., Бережная А.Ю.

Запорожский национальный университет Украина, 69600, г. Запорожье, ул. Жуковского, 66

Разработан метод комплексонометрического определения содержания циркония в сплавах на основе титана VT-9, VT-20 и в цирконовом концентрате. Обоснована необходимость использования химических методов в текущем контроле качества титановых сплавов и цирконового концентрата.

В качестве титранта для определения использована динатриевая соль этилендиаминтетрауксусной кислоты (комплексон ІІІ), индикатор- 3,3-бис-ди(карбоксиметил)амінометил-о-крезолсульфоталеин (ксиленоловый оранжевый). Доказано, что цирконий образует устойчивый комплекс с комплексом ІІІ при эквивалентном соотношении 1:1 (константа стойкости-29,5).

Правильность метода определения содержания циркония доказана сравнением со стандартизованным гравиметрическим методом.

Ключевые слова: сплавы на основе титана, цирконовыи концентрат, цирконий, комплексонометрический метод, динатриевая соль этилендиаминтетрауксусной кислоты, ксиленоловый оранжевый, гравиметрический метод, стандартный образец.

DEVELOPMENT OF COMPLEXOMETRIC METHOD OF ZIRCONIUM DETERMINATION IN TITANIUM-BASE ALLOYS VT-9, VT-20 AND IN ZIRCON CONCENTRATE

Omelianchuk L.O., Syniaeva N.P., Berezhna O.Iu.

Zaporizhzhya National University Ukraine, 69600, Zaporizhzhya, Zhukovskogo str., 66

INTRODUCTION

Titanium-base alloys are distinguished by valuable mechanical-and-physical properties and have a high rust resistance. Strength-to-weight titanium ratio is higher, than in many alloy structure steels, that is why under steels substitution by titanium-base alloys, it is possible to reduce the detail weight by 40 %.

Titanium-base alloys retain mechanical strength characteristics in compared to high temperatures (up to 650 °C), at least higher compared to operating temperature of aluminum-base alloys, steel and heat-resistant nickel-base alloys. It is this factor determines prefer the use of titanium in the aviation and aerospace technology [1, 2].

In the homeland design bureaus according to established traditions for details GTE, working in the same temperature - power conditions, using different brands of high-temperature titanium-base alloys.

An important step in the production of titanium-base alloys is the introduction of alloying elements in the form of binary alloys (in this case of zirconium-base alloys) which, depending on the content, determine the mechanical-and-physical properties of alloys.

Binary zirconium alloys obtained using techniques of zircon concentrate in which the contents of zirconium (IV) oxide is about 67% [3, 4].

Properties like ligatures and titanium-base alloys depend on the precise definition of the alloying element content.

MATERIALS AND RESEARCH METHODS

The investigation is concerned with heat-resistant titanium-base alloys VT-9, VT-20 and zircon concentrate.

For elevated-temperature strengthening titanium-base alloys resource use alloying. It is very important to know under what conditions and in what quantities should be added alloying elements.

Choosing the best analysis method and determination of zirconium in titanium-base alloys depends on the content of zirconium in alloy and the influence of interfering elements [5].

Today known a variety of tools (physical-and-chemical) and chemical methods for determination of zirconium in titanium-base alloys. Of instrumental procedure most commonly used are spectral and atomic absorption method. These methods are express, precise, but for determining require expensive equipment, skilled workers and create reference materials that simulate the composition and structure of the investigated material (alloy).

For this purpose, chemical methods are still relevant. The most common is photocolometric and gravimetric method, but they also have some significant disadvantages (long term, have a complex sample preparation, many operations). Therefore, development of a new method of titrimetric determination of zirconium in titanium-base alloys is the relevant issue.

During the determination used direct complexometric titration method with xylenol orange indicator and as a reference method - gravimetric method.

RESULTS AND DISCUSSION

For standardization it is used a state standard reference sample Titanium Alloy C101 P8290 BATCH A (MBH Analytical LTD) weight percent of zirconium $Zr = 2,98\%$.

Check on results of the developed method (table 1) carried out by comparison of gravimetrical method of determination is presented in GOST (All Union State Standard) 19863.13-91.

Table 1 – Validity check of the developed methodology on zirconium dermination in titanium-based alloys VT-9, VT-20 and in zircon concentrate (n=3, p=0,95)

№	Analyzed Substance	Determination method	
		Gravimetric method, % weight	Complexometric method, % weight
1	VT-9	1,80 ± 0,05	1,83 ± 0,14
2	VT-20	2,34 ± 0,06	2,36 ± 0,11
3	Zircon concentrate	66,38 ± 0,08	66,42 ± 0,14

Thus the method of direct complexometric titration method allows to obtain results that correspond accuracy of reference method [6,7].

CONCLUSIONS

1. Developed a direct complexometric titration method of zirconium in titanium-base alloys (VT-9, VT-20) and inorganic compound (zircon concentrate).
2. Show by experiments, that optimum conditions for complexometric zirconium determination is use of titrant disodium salt of ethylenediaminetetraacetic acid (complexon III) as an indicator – xylenol orange under pH solution 1-2.
3. Experimentally-confirmed correlation of findings by developed method of direct complexometric titration and reference gravimetric method.

Key words: titanium-based alloys, zirconium concentrate, zirconium, complexometric method, disodium salt of ethylenediaminetetraacetic acid (complexon III), xylenol orange, a gravimetric method, a standard sample.

ВСТУП

Титанові сплави відрізняються цінними фізико-механічними властивостями і мають високу корозійну стійкість.

Питома міцність титану вище, ніж у багатьох легованих конструкційних сталей, тому при заміні сталей титановими сплавами можна зменшити масу деталі на 40 %.

Титанові сплави зберігають міцнісні властивості до порівняно високих температур (до 650 °С), принаймні, більш високих у порівнянні з робочими температурами алюмінієвих сплавів, сталями і жароміцними нікелевими сплавами. Саме цей чинник визначає перевагу застосування титану в авіаційній та аерокосмічній техніці [1,2].

Ефективність застосування титанових сплавів можна значно підвищити легуванням. Легування титану дозволяє в 2-3 рази підвищити його міцність, іноді і корозійну стійкість.

Основний легуючий елемент у промислових титанових сплавах – алюміній.

Проте відповідно до тенденції багатокомпонентного легування сучасні промислові титанові сплави містять одночасно в якості легуючих компонентів і алюміній, і хром, ферум, купрум, станум, цирконій.

За впливом на поліморфізм титану С.Г. Глазунов розділив всі легуючі елементи на 3 групи. Цирконій – легуючий елемент, який мало впливає на температуру поліморфного перетворення титану – нейтральний зміцнювач, так як не змінюючи істотно фазовий склад сплавів, він підвищує його характеристики.

З усіх фізичних властивостей легуючих компонентів найбільш важливими (з точки зору рівномірного розподілу в рідкій ванні металу) є їх температура плавлення і щільність.

Перш за все, від температури плавлення компонента залежить ступінь рівномірності його розподілу в розплаві металу, відсутність локальних включень та місцевої мікронеоднорідності.

Якщо забезпечити повне розплавлення і розчинення легуючих компонентів у формованій плівці рідкого металу на торці електрода, що витрачається, то можна практично повністю виключити вплив їх щільності на рівномірність розподілу за обсягом рідкої ванни.

Цирконій – найближчий аналог титану, має близьку температуру плавлення і також володіє поліморфізмом.

Цирконій, в порівнянні з іншими легуючими добавками, є для титану досить слабким зміцнювачем. Однак при підвищених температурах зміцнююча дія цирконію проявляється сильніше.

З цієї причини цирконій нерідко входить до складу жароміцних титанових сплавів. В основі більшості промислових титанових сплавів загального призначення лежить потрійна система Ti - Al - Mo, на якій засновано багато титанових сплавів, особливо жароміцні, наприклад, сплав ВТ-9. Цей сплав відрізняється високою термічною стабільністю.

У вітчизняних конструкторських бюро залежно від сформованих традицій для деталей ГТД, що працюють в однакових температурно – силових умовах, використовують різні марки жароміцних титанових сплавів. Жароміцність сплаву ВТ-20 обумовлена високим вмістом алюмінію і цирконію (система Ti- Al- Zr).

Цирконовий концентрат (60-67% цирконію) використовується в якості сировини у виробництві феросплавів на основі цирконію, металевого цирконію, у виробництві кераміки (емалі, глазури).

Важливим етапом виробництва титанових сплавів є введення легуючих елементів у вигляді бінарних сплавів (у даному випадку сплавів цирконію), які, в залежності від вмісту, визначають механічні та фізичні властивості сплавів.

Бінарні сплави цирконію одержують у технологіях з використанням цирконового концентрату[3,4].

Хімічний склад цирконового концентрату:

- 60,0 - 67,0% мас. цирконій (IV) оксид (ZrO_2);
- 0,01- 0,09% мас. ферум (III) оксид (Fe_2O_3);
- 0,03- 0,4% мас. титан (IV) оксид (TiO_2);
- 1,8 - 2,0% мас. алюміній (III) оксид (Al_2O_3).

Властивості як лігатур так і титанових сплавів залежать від точного визначення вмісту цирконію в якості легуючого елементу.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є жароміцний сплав на основі титану ВТ-9, ВТ-20 та цирконовий концентрат.

Для підвищення жароміцності та ресурсу титанових сплавів застосовується легування. При цьому дуже важливо знати при яких умовах і в яких кількостях слід додавати легуючі елементи .

Вибір оптимального методу аналізу та визначення цирконію у титанових сплавах залежить від вмісту цирконію у сплаві та впливу заважаючих елементів [5].

На сьогодні відомі різноманітні інструментальні (фізико-хімічні) та хімічні методи визначення цирконію у титанових сплавах.

Фізико-хімічні методи визначення цирконію

Стандартизованим вибіркоким методом визначення цирконію є атомно-абсорбційний метод визначення цирконію у жароміцних сплавах на основі титану.

Розрізняють метод атомно-абсорбційного визначення за допомогою лампи з порожнистим катодом та метод атомно-абсорбційного визначення за допомогою неперервного джерела світла.

Для атомно-абсорбційного визначення вмісту цирконію в жароміцних сплавах на основі титану можна застосувати спектрофотометр Hitachi 180-80.

Джерелом випромінювання світла слугує лампа з порожнистим катодом. Низька інтенсивність ліній випромінювання цирконію не надає можливості отримати чіткий сигнал, що проявляється як погіршення відношення сигнал-шум і у рівному ступені впливає на точність та межу виявлення, тому отримати достовірні результати для визначення цирконію у жароміцних сплавах на основі титану методом атомно – абсорбційного визначення за допомогою лампи з порожнистим катодом та оптичної схеми Черні-Тернера ускладнено.

Атомно-абсорбційний метод визначення цирконію за допомогою використання неперервного джерела світла

В розробці нового типу атомно-абсорбційного спектрометра ContrAA-300 використано подвійний монохроматор та суцільне джерело світла – високоінтенсивна ксенонова лампа. Прикладом спектрофотометру високого дозволу з єдиним джерелом світла є прилад компанії Analytik Jena серії ContrAA - 300. Ксенонова лампа є джерелом стабільного і неперервного спектру. Неперервне випромінювання таких ламп в широкому спектральному діапазоні збуджується при проходженні дугового розряду постійного току крізь атмосферу ксенону. Спектр випромінювання даних ламп неперервний між 190-700 нм.

Визначення проводиться у відновлювальному полум'ї ацетилен - нітроген (I) оксид ($T=2700^{\circ}\text{C}$), при довжині хвилі $\lambda=360,1\text{нм}$, робоча область вимірювання становить до 600 мкг/см^3 .

Метод атомно - емісійної спектрометрії з індуктивно-зв'язаною плазмою

В плазмі вступний газ нагрівається до 8000- 10 000 К. Газокінетична температура в ІСП 5000-6000 К, тому її іони і атоми володіють високими енергіями і швидкостями, що дає можливість визначати важкоатомізовані елементи (цирконій) без докладання великих зусиль [19, 20].

У якості раціональних аналітичних імісійних ліній для визначення цирконію використовується лінія з довжиною хвилі 343,82 нм.

Вибір лінії обумовлений складом досліджуваного матеріалу, можливим спектральним накладанням ліній супутніх компонентів, наявністю неперервного фону зі сторони матриці, впливом легко іонізованих компонентів, які вносять при пробопідготовці, а також необхідна наявність емісійної лінії у бібліотеці програмного забезпечення використовуваного спектрометру.

Для емісійної лінії цирконію (343,82 нм) встановлена відсутність впливу з боку титану, алюмінію, молібдену.

Метод дозволяє визначити масову долю цирконію з більшою швидкістю, перевагою методу є можливість одночасного багатоелементного аналізу, висока точність результатів, широкий динамічний діапазон визначення концентрацій, але для проведення калібрування приладу потрібно мати стандартні зразки ідентичного складу і структури, що і аналізована речовина (сплав або неорганічний матеріал).

Отримані результати слугують передумовами розробки універсальної, експресної методики визначення цирконію в жароміцних сплавах на основі титану, якщо буде вирішене питання розробки стандартних зразків.

Отже можна зробити висновок, що фізико-хімічні методи експресні, точні, проте для проведення визначення потребують дорогої апаратури, кваліфікованих працівників та створення стандартних зразків, що імітують склад, структуру досліджуваного матеріалу (сплаву).

Тому хімічні методи визначення цирконію не втратили своєї актуальності. Відомі фотокolorиметричний метод визначення цирконію із застосуванням органічних реагентів

арсеназо III (діапазон визначення від 0,02 до 0,5% мас. цирконію) та ксиленолового оранжевого (чутливість методу – 0,005%) та гравіметричний метод (діапазон визначення 0,5- 20% мас. цирконію). Гравіметричний фосфатний метод заснований на розчиненні проби у сульфатній кислоті, осадженні цирконію дизаміщеним фосфорнокислим амоніаком, в присутності гідроген пероксиду, у вигляді цирконій дигідрогенфосфату та прожарюванні осаду при температурі 1000 ± 10 С до цирконій (IV) фосфату ($Zr_3(PO_4)_4$) і зважуванні прожареного осаду. Недолік методу полягає в тому, що він має довготривалий термін виконання (визначення йде більше 8 годин).

Хімічні методи визначення вмісту цирконію в титанових сплавах також мають ряд суттєвих недоліків (довготривалі, мають складну пробопідготовку, багато операцій). Саме тому розробка нового титриметричного методу визначення цирконію в титанових сплавах є питання актуальне.

Тому одним з перспективних, для визначення цирконію в серійному виробництві на базі досконального аналізу всіх відомих методів визначення цирконію в титанових сплавах та його неорганічної сполуки (цирконового концентрату), може бути метод комплексонометричного титрування.

Під час проведення визначень використано метод прямого комплексонометричного титрування з індикатором ксиленоловий оранжевий, та в якості арбітражного методу - гравіметричний метод.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження проводились в хіміко-аналітичній лабораторії на АО «Мотор Січ» та державному підприємстві Державний науково-дослідний та проектний інститут титану.

Найбільше практичне значення комплексон III (динатрієва сіль етилендіамінтетраетанової кислоти) має для титриметричного визначення цирконію.

Комплексон III утворює з цирконієм стійкий у кислому середовищі комплекс (рис. 1) при еквівалентному відношенні 1:1 (константа стійкості $ZrY=29,5$).

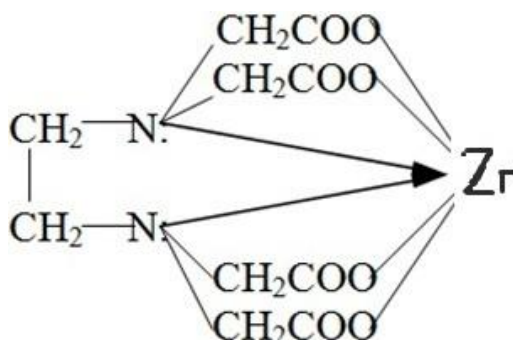


Рисунок 1 – Комплексна сполука цирконію з комплексом III

Цирконій відрізняється від всіх інших іонів тим, що він утворює найбільш міцну сполуку з комплексом III і може бути відтитрований у більш кислому середовищі (рН=1-2), ніж інші іони металів.

Саме завдяки цьому лише деякі сторонні іони заважають комплексометричному титруванню цирконію.

Таким чином комплексометричні методи визначення цирконію досить селективні

Вибір наважки для проведення аналізу був обумовлений тим, що для забезпечення найменшої похибки титрування вміст цирконію в 100 см³ розчину повинен становити не менше 50 мг.

Саме тому для аналізу титанових сплавів ВТ-9, ВТ-20 маса наважки обрана шляхом розрахунку та становила 1,0 г, а для цирконового концентрату- 0,1г.

Для аналізу використано зразки титанових сплавів ВТ-9, ВТ-20 у вигляді стружки та цирконовий концентрат у вигляді порошку. Стружку масою 0,1 та 1,0 г зважували на аналітичних вагах фірми RADWAG.

При титруванні цирконію до аналізованого розчину додають, в якості індикатора, будь-яку органічну сполуку (еріохромціанін, арсеназо та ін.), що утворює з цирконієм інтенсивно забарвлену комплексну сполуку, менш стійку, ніж з комплексом III.

Після того, як увесь цирконій прореагує з комплексом III, відбудеться зміна кольору, внаслідок руйнування забарвленої сполуки цирконію.

Чітка зміна кольору індикатора при титруванні цирконію розчином комплексу III може бути досягнута у тому випадку коли константа стійкості сполуки цирконію з індикатором буде у 10⁴ разів менше константи стійкості комплексонату цирконію.

Всім перерахованим вище умовам найкраще відповідає органічний індикатор ксиленоловий оранжевий.

При розробці уніфікованої експресної методики визначення вмісту легуючого елементу цирконію в жароміцних титанових титриметричним методом досліди проводили на бюретці місткістю 10 см³, що відповідала ГОСТ29251-91[6].

Установка титру: для установки титру нами був використаний Державний стандартний зразок Titanium Alloy C101 P8290 ВАТСНА (MBN Analytical LTD) масова частка цирконію Zr = 2,98%.

Результати дослідження титру представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Розрахунок титру

№	V (трилона Б 0,05N), см ³	T, г/см ³	T _{сер.} г/см ³
1	5,4	0,00275	0,00266
2	5,8	0,00257	

Результати дослідження вмісту цирконію в титановому сплаві ВТ-9 представлені в табл.2.1.

Таблиця 2.1– Результати дослідження вмісту цирконію в титановому сплаві ВТ-9 (n=5, p=0,95)

Тип сплаву	№	V(0,05Nтрилона Б), см ³	Zr, % мас.	Zr(%) _{сер±ε}
ВТ-9	1	7,4	1,97	1,83±0,14
	2	6,4	1,70	
	3	6,6	1,76	
	4	7,2	1,92	
	5	6,8	1,81	

Результати дослідження вмісту цирконію в титановому сплаві ВТ-20 представлені в табл.2.2

Таблиця 2.2– Результати дослідження вмісту цирконію в титановому сплаві ВТ-20 (n=5, p=0,95)

Тип сплаву	№	V(0,05Nтрилона Б), см ³	Zr, % мас.	Zr(%) _{сер±ε}
ВТ-20	1	9,4	2,50	2,36±0,11
	2	8,8	2,30	
	3	8,8	2,30	
	4	9,0	2,39	
	5	8,8	2,30	

Результати дослідження вмісту цирконію, а саме цирконій (IV) оксиду (ZrO₂) в цирконовому концентраті представлені в табл.3.

Таблиця 3 – Результати дослідження вмісту цирконію в цирконовому концентраті (n=5, p=0,95)

№	V (0,1N Трилона Б), см ³	X(ZrO ₂), % мас.	X _{середнє} (ZrO ₂)±ε
1	5,40	66,42	66,42±0,14
2	5,42	66,67	
3	5,41	66,42	
4	5,38	66,17	
5	5,40	66,42	

Контроль правильності результатів розробленої методики (табл.4) проведено порівнянням з гравіметричним методом визначення, що представлений у ГОСТ 19863.13-91[7].

Таблиця 4 – Контроль правильності розробленої методики визначення цирконію в титанових сплавах ВТ-9, ВТ-20 та в цирконовому концентраті (n=3,p=0,95)

№	Аналізована Речовина	Метод визначення	
		Гравіметричний метод, % мас.	Комплексонометричний метод, % мас.
1	ВТ-9	1,80 ± 0,05	1,83± 0,14
2	ВТ-20	2,34± 0,06	2,36± 0,11
3	Цирконовий концентрат	66,38± 0,08	66,42± 0,14

Таким чином метод прямого комплексонометричного титрування дозволяє одержати результати, які відповідають точності арбітражного методу [7].

ВИСНОВКИ

1. Розроблено метод прямого комплексонометричного титрування цирконію в титанових сплавах (ВТ-9, ВТ-20) та неорганічній сполуці (цирконовому концентраті).
2. Експериментально показано, що оптимальними умовами для комплексонометричного визначення цирконію є: використання в якості титранта – динатрієвої солі етилендіамінтетраетанової кислоти (комплексонуІІІ), в якості індикатора – ксиленолового оранжевого при рН розчину 1-2.
3. Експериментально підтверджена кореляція результатів одержаних за розробленим методом прямого комплексонометричного титрування та арбітражним гравіметричним методом.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ильин А.А. Титановые сплавы. Состав, структура свойства / А.А. Ильин, Б.А. Колачев, И.С. Польшкин – М.:ВИЛС-МАТИ, 2009. –520 с.
2. Антонюк С.Л. Титановые сплавы для авиационной промышленности Украины / С.Л. Антонюк, А.Г. Моляр, А.Н. Калинюк // Современная электрометаллургия. – 2003. – №1. – С.10-14.
3. Богуслаев В.А. Изготовление заготовок деталей газотурбинных двигателей и титановых сплавов / В.А. Богуслаев, А.И. Долматов, П.Д. Жеманюк – Запорожье : Мотор Сич, 2000. – 290с.
4. Богуслаев В.А. Повышение ресурса деталей ГТД из титановых сплавов / В.А. Богуслаев, А.И. Долматов, П. Д. Жеманюк – Запорожье : Мотор Сич, 2000. – 110с.
5. Элвелл В.Т., Вуд Д.Ф. Анализ новых металлов : Титан, цирконий, гафний, ниобий, тантал, вольфрам и их сплавы пер. с англ. – М. : Химия, 1970. – 220 с.
6. Посуда лабораторная стеклянная. Бюретки. Часть 1. Общие требования: ГОСТ 29251-91: 01.07.1992. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам,1984. –14с.
7. Сплавы титановые. Методы определения циркония: ГОСТ 19863.13-91: 01.07.1992. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1991. – 9 с.

REFERENCES

1. Ilin A.A. Titanovyie splavyi. Sostav, struktura svoystva / A.A. Ilin, B.A. Kolachev, I.S. Polkin – М.:VILS-MATI, 2009. –520 s.
2. Antonyuk S.L. Titanovyie splavyi dlya aviatsionnoy promyishlennosti Ukrainyi / S.L. Antonyuk, A.G. Molyar, A.N. Kalinyuk // Sovremennaya elektrometallurgiya. – 2003. – #1. – S.10-14.
3. Boguslaev V.A. Izgotovlenie zagotovok detaley gazoturbinnnyih dvigateley iz titanovyih splavov / V.A. Boguslaev, A.I. Dolmatov, P.D. Zhemanyuk – Zaporozhe : Motor Sich, 2000. – 290s.
4. Boguslaev V.A. Povyishenie resursa detaley GTD iz titanovyih splavov / V.A. Boguslaev, A.I. Dolmatov, P. D. Zhemanyuk – Zaporozhe : Motor Sich, 2000. – 110s.
5. Elvell V.T., Vud D.F. Analiz novyih metallov : Titan, tsirkoniy, gafniy, niobiy, tantal, volfram i ih splavyi per. s angl. – М. : Himiya, 1970. – 220 s.
6. Posuda laboratornaya steklyannaya. Byuretki. Chast 1. Obschie trebovaniya: GOST 29251-91: 01.07.1992. – М.: Gosudarstvenniy komitet SSSR po standartam,1984. –14s.
7. Splavyi titanovyie. Metodyi opredeleniya tsirkoniya: GOST 19863.13-91: 01.07.1992. – М.: Gosudarstvenniy komitet SSSR po standartam, 1991. – 9 s.

Рецензенти: Пономаренко Н.І. к.фарм.н., доцент кафедри хімії та екології Запорізького національного технічного університету;
Луганська О.В. к.х.н., доцент кафедри хімії ЗНУ.