

УДК 546.3-19 : 669,295

## К ВОПРОСУ О КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

**Солдатенко И.В.**

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия  
e-mail: iv\_soldatenko@mail.ru*

---

Обобщены результаты исследований, направленных на повышение объективности оценки макроструктуры полуфабрикатов из титановых сплавов. Предложена количественная оценка макроструктуры по трем параметрам: размеру зерна, степени его неравноосности и тональности.

*Ключевые слова:* титановые сплавы, макроструктура, микроструктура, параметры структуры, размер зерна, неравноосность, тональность.

---

Металлургическое производство предусматривает различные виды промежуточного и сдаточного контроля качества металлопродукции. Объемы и методы контроля регламентируются государственными и отраслевыми стандартами, техническими условиями и инструкциями предприятия на производство и поставку продукции. Чаще всего контролю подлежат химический состав, механические свойства макро-, микроструктура и др. В настоящее время оценку структуры полуфабрикатов из титановых сплавов проводят с использованием типовых шкал, разработанных для разных сплавов и видов полуфабрикатов [1—4].

Указанные шкалы являются обобщением производственного опыта по контролю структуры и свойств полуфабрикатов из титановых сплавов. Эталоны представленных в них структур отражают особенности структуры полуфабрикатов в зависимости от состава сплава, условий деформирования

и последующей стандартной термообработки. Принадлежность структуры к определенному баллу (типу) той или иной шкалы определяется не только размером зерна, как это принято для сталей, но и внутризеренным строением.

Для полуфабрикатов из  $(\alpha + \beta)$ -титановых сплавов характерно большое разнообразие структур. Это разнообразие определяется такими факторами, как: наличие двух фаз  $\alpha$  и  $\beta$ ; изменение количественного соотношения этих фаз; возможность образования метастабильных фаз (являющихся продуктом незавершенного  $\beta \rightarrow \alpha$  превращения); широкий диапазон изменения размера и формы структурных составляющих и возможность получения различных сочетаний их форм и размеров.

Описать каждый из типов структуры любой шкалы с помощью одного какого-либо параметра не представляется возможным. Это лишает деление

структуры на баллы физической основы, вносит элемент субъективности и затрудняет использование шкал. Кроме того, указанные шкалы в связи с ограниченным количеством использованных эталонов далеко не исчерпывают всего многообразия структуры титановых сплавов.

Все шкалы построены на качественных, а не на количественных различиях, что делает невозможной надежную оценку влияния структуры на механические свойства, затрудняет изыскание путей повышения механических свойств за счет регламентации структуры [5].

Структура сталей не менее многообразна и сложна, чем структура титановых сплавов. Однако существующая балльная оценка структуры сталей основана на количественных данных конкретных параметров структуры. Каждую структуру описывают набором характерных для нее параметров. Их количественную оценку проводят по соответствующим балльным шкалам [6–8].

Вопрос о пересмотре действующих шкал для титановых сплавов и совершенствовании принципов их построения вставал неоднократно, и в последние годы в этом направлении была проделана большая работа. Рассмотрим подробнее, что было сделано для усовершенствования контроля макроструктуры титановых сплавов.

Известно, что макроструктуру изучают невооруженным глазом или с помощью лупы (при увеличении до 10–20 раз) после механической обработки поверхности макрошлифа (темплета) и последующего его травления [9]. За макрозерно принимают тот участок на плоскости макрошлифа, в пределах которого (при фиксированном положении макрошлифа) при наблюдении невооруженным глазом степень блеска однородна.

При анализе макроструктуры было выявлено, что на величину макрозерна в двухфазных титановых сплавах оказывает влияние внутризеренное строение, т.е. микроструктура сплава [10].

В макроструктуре мы видим лишь те элементы структуры, размер которых превышает 150 мкм (т.е. превышает разрешающую способность глаза). Исследования серийных полуфабрикатов показали, что такими элементами в микроструктуре являются  $\beta$ -зерна,  $\alpha$ -колонии и внутризеренные образования  $\alpha$ -фазы, если их наибольшее сечение параллельно плоскости шлифа или пересекается ею под небольшим углом.

Таким образом, было установлено, что на величину и форму зерен, наблюдаемых в макроструктуре, влияют размер и форма  $\beta$ -зерен ( $D$ ) и  $\alpha$ -колоний ( $d$ ) в микроструктуре.

Существующая стандартная 10-балльная шкала макроструктур (рис. 1) составлена на основе  $\beta$ -зерна четкой равноосной формы, свойственной недеформированному состоянию сплава, с мелкопластинчатым внутризеренным строением [1].

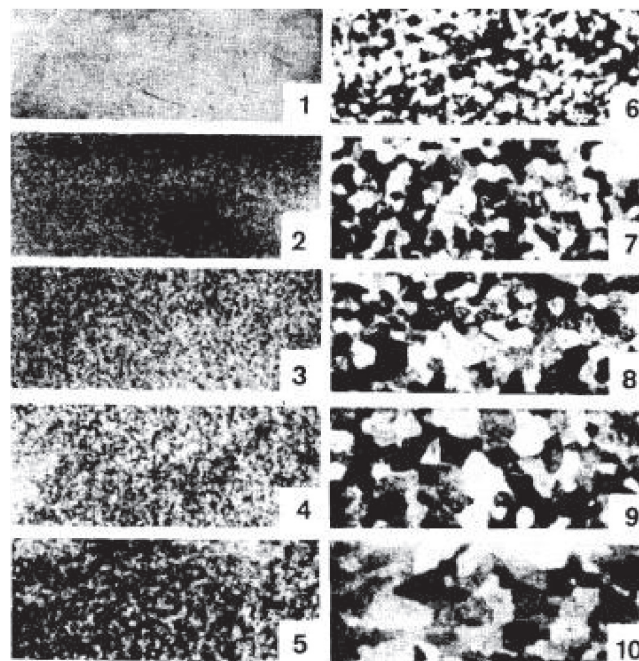


Рис. 1. Стандартная 10-балльная шкала макроструктур

В таблице приведены размеры  $\beta$ -зерен, соответствующие каждому баллу стандартной шкалы макроструктур.

**Величина структурных составляющих, соответствующая разным баллам стандартной шкалы макроструктур**

Балл макроструктуры	Размер $\beta$ -зерна ( $D$ ), мкм	Максимальный размер $\alpha$ -колоний ( $d$ ), мкм
1	< 100	30
2	100-200	50
3	250-350	100
4	400-500	150
5	500-700	200
6	1000-1200	400
7	1500-2000	600
8	3000	1000
9	4000	1300
10	более 5000	

В зависимости от режима обработки величина  $\alpha$ -колоний в одном и том же зерне может изменяться в широких пределах. Максимальный размер  $\alpha$ -колоний обычно не превышает 1/3 от размера  $\beta$ -зерна (см. таблицу).

Исследования макро- и микроструктуры титановых сплавов показали, что в титановых сплавах микрозерно и макрозерно не всегда идентичны и могут существенно различаться по величине.

Так, при мелкодисперсном внутризеренном строении, когда размеры  $\alpha$ -колоний меньше разрешающей способности глаза ( $d \leq 150$  мкм), макрозерно совпадает с формой и размерами  $\beta$ -микрозерна (рис. 2,а).

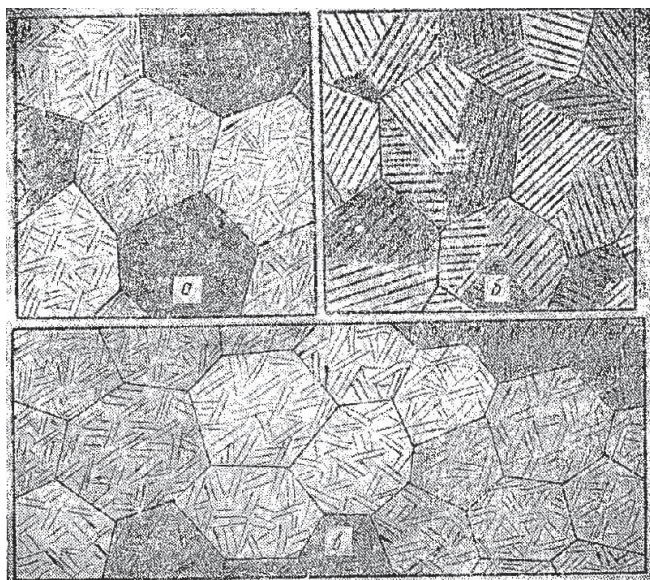


Рис. 2. Влияние внутризеренного строения на величину макрозерна в титановых сплавах (схема): а —  $d \leq 100$  мкм; б —  $d > 100$  мкм; в —  $\varphi < 5^\circ$  [10]

В случае грубопластинчатого внутризеренного строения ( $d > 150$  мкм) отдельные  $\alpha$ -колонии видны невооруженным глазом. В этом случае колония  $\alpha$ -пластин играет роль одного  $\alpha$ -зерна и макрозерно по размерам и форме совпадает с  $\alpha$ -колонией (рис. 2,б).

Если кристаллографические разориентировки на границе между соседними  $\beta$ -микрозернами невелики ( $\varphi < 5^\circ$ ), то в макроструктуре несколько микрозерен составляют одно макрозерно (рис. 2,в). Но во всех случаях измельчение микрозерна непременно сопровождается измельчением макрозерна.

На форму и размер зерен влияет деформация при температурах как  $\beta$ -, так и  $\alpha + \beta$ -области. В плоскости осадки размер зерен увеличивается по мере увеличения степени деформации  $\epsilon$ , но при этом сохраняется их равноосная форма (рис. 3). В плоскости, перпендикулярной плоскости осадки, зерна вытягиваются. Соотношение максимальных продольных и поперечных размеров зерна (степень неравноосности К) четко связано с физической

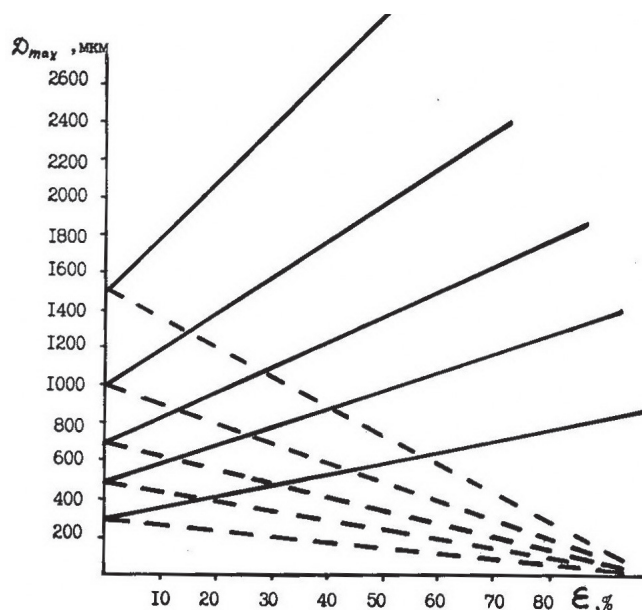


Рис. 3. Изменение продольных (сплошные линии) и поперечных (пунктирные линии) размеров  $\beta$ -зерен в зависимости от степени деформации осадкой

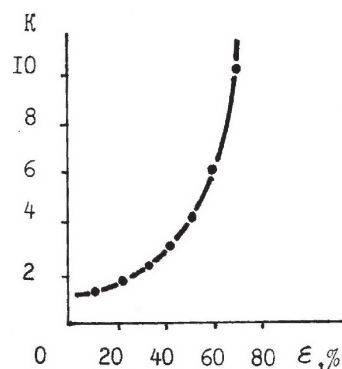


Рис. 4. Изменение степень неравноосности К  $\beta$ -зерна в зависимости от степени деформации осадкой ( $\epsilon$ ,%)

степенью его деформации (рис. 4). Это еще один из важных параметров оценки макроструктуры помимо самой величины макрозерна.

Наряду с изменением формы макрозерна, в результате деформации меняется также тональность макроструктуры, другими словами, степень блеска, которая, как известно, свойственна металлам благодаря высокой отражательной способности.

Исследования структуры серийных полуфабрикатов и лабораторных образцов из  $\alpha + \beta$ -сплавов при разных увеличениях (от невооруженным глазом до  $\times 500$ ) показали, что степень блеска макроструктуры титановых сплавов связана с определенными количественными изменениями в микроструктуре. Было предложено классифицировать тональность макроструктуры на четыре типа (А, Б, В, Г) следующим образом:



*Тип А* — совершенно блестящая макроструктура.

При вращении макрошлифа блестят попеременно все зерна. Количество одновременно блестящих зерен составляет 40—50% площади макрошлифа. Макроструктура *А* характерна для сплавов, деформированных в  $\beta$ - или высокотемпературной  $\alpha + \beta$ -области (не ниже  $T_{\text{пл}} - 10^\circ \text{C}$ ). Микроструктура всегда пластинчатого типа с  $\beta$ -зерном равноосной или вытянутой формы ( $K = 1 \div 3$ ) независимо от дисперсности внутризеренного строения. Такая макроструктура присуща сплавам с рекристаллизованным или слабо деформированным  $\beta$ -зерном, размер которого превышает 100 мкм.

*Тип Б* — макроструктура блестящая с элементами матовой (смешанная). При вращении макрошлифа попеременно блестит примерно 60—80% всех зерен. Количество одновременно блестящих зерен составляет около 30—40% от площади макрошлифа. Макроструктура *Б* наблюдается в сплавах со средней степенью деформации в  $\alpha + \beta$ -области ( $\epsilon = 10\text{—}35\%$ ,  $K = 1.2\text{—}2.5$ ). Внутризеренное строение очень неоднородно. В пределах одного  $\beta$ -зерна наблюдаются микроучастки с разной степенью развития сфероидизации  $\alpha$ -фазы: от глобулярной, до практически несфероидизированной, пластинчатой формы частиц. Размер участков с одной степенью сфероидизации  $\alpha$ -фазы соизмерим с размером  $\alpha$ -колоний в исходной структуре. Размер  $\alpha$ -колоний  $d \geq 150$  мкм. За появление матовой составляющей в макроструктуре ответственны наиболее деформированные участки микроструктуры, в которых возникает значительная кристаллографическая разориентировка в  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазах, что, в свою очередь, приводит к нарушению пластинчатого характера структуры. В остальных же малодеформированных участках сохраняется пластинчатый характер  $\alpha$ -выделений, в пределах которых сохраняется общая кристаллографическая ориентировка  $\alpha$ -фазы.

*Тип В* — макроструктура зернистая матовая с элементами блестящей. При вращении макрошлифа блестит не более 20—40% всех зерен. Количество одновременно блестящих (в фиксированном положении макрошлифа) не более 10—20%. Макроструктура *В* характерна для сплавов, деформированных в  $\alpha + \beta$ -области со степенью 40—55% ( $K = 3.5\text{—}5.0$ ). Микроструктура характеризуется значительной степенью развития сфероидизации  $\alpha$ -фазы. Структура преимущественно глобулярная

или глобулярно-пластинчатая. На отдельных участках сохраняется направленный характер выделений  $\alpha$ -фазы, которые в случае их крупных размеров и ответственны за появление в макроструктуре отдельных блестящих участков. Мелкие микроучастки с пластинчатым характером  $\alpha$ -выделений не блестят, поэтому площадь участков, обеспечивающих блеск в макроструктуре, меньше, чем площадь, занятая  $\alpha$ -фазой с пластинчатым характером. При прочих равных условиях блестящих участков тем больше, чем крупнее исходное зерно и  $\alpha$ -колонии внутри него.

*Тип Г* — совершенно матовая макроструктура. При любом положении макрошлифа блестящих зерен не наблюдается. Макроструктуре *Г* соответствует глобулярная или глобулярно-пластинчатая микроструктура. Могут присутствовать в структуре и сравнительно небольшие участки с направленным характером выделений  $\alpha$ -фазы, хотя и хорошо сфероидизированные. Зернистый характер макроструктуры при такой глобулярной микроструктуре связан с тем, что при деформации пластинчатая структура трансформируется в глобулярную путем сфероидизации, инициируемой процессами полигонизации в  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазах. При этом сохраняется общность ориентировки  $\beta$ -фазы в пределах всего исходного  $\beta$ -зерна, а  $\alpha$ -фазы — в пределах исходной  $\alpha$ -колонии. Проявление зернистого характера макроструктуры тем больше, чем меньше разориентировка  $\alpha$ - и  $\beta$ -субзерен. С увеличением степени деформации разориентировка субзерен растет. Пока размер субзерен не превышает 100 мкм, они не видны. Такому состоянию соответствует матовая не зернистая макроструктура.

Было установлено, что чем крупнее исходное  $\beta$ -зерно, тем больше должна быть степень  $\alpha + \beta$ -деформации для получения матовой макроструктуры (рис. 5). Так, для получения матовой макроструктуры с ростом макрозерна от 3—4 баллов до 7—8 баллов, необходимо увеличение степени  $\alpha + \beta$ -деформации с 40—50% до 70—80%.

## Выводы

Исследования показали, что макроструктура титановых сплавов сложнее, чем кажется, и характеризуется не одним параметром, а тремя: величиной зерна, его неравноосностью и тональностью (степенью блеска). Оценку размера зерна проводят по известной 10-балльной шкале. Для оценки двух других параметров разработаны шкалы, каждому эталону в которых приписано определенное коли-

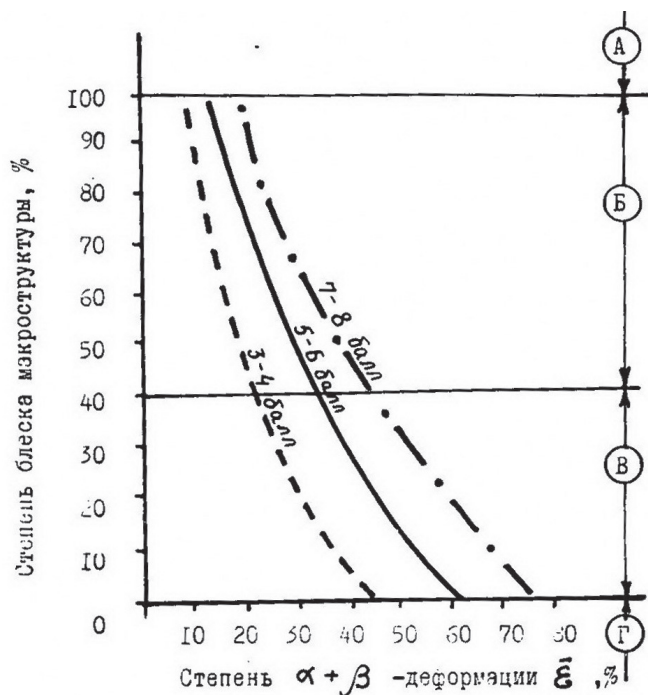


Рис. 5. Изменение степени блеска макроструктуры (доля блестящих микроучастков в плоскости макрошлифа) в зависимости от степени  $\alpha + \beta$ -деформации

численное значение соответствующего параметра макроструктуры.

Повышение конкурентоспособности полуфабрикатов из титановых сплавов на мировом рынке невозможно без объективной и однозначной оценки качества продукции, а контроль макроструктуры является одной из важных ее составляющих. Назрела необходимость выработки требований к макроструктуре титановых сплавов на основе ее количе-

ственной оценки по трем параметрам: размеру зерна, степени его неравноосности и тональности.

#### Библиографический список

1. Борисова Е.А., Бочвар Г.А., Брун М.Я. и др. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов. — М.: Металлургия, 1980. — 464 с.
2. Александров В.К., Аношкин Н.Ф., Бочвар Г.А. и др. Полуфабрикаты из титановых сплавов. — М.: Металлургия, 1979. — 512 с.
3. Истракова А.Р., Кашапов О.С., Калашников В.С. Исследование влияния режимов отжига на структуру и фазовый состав штамповок моноколес из сплава ВТ8-1 // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 2. С. 142-151.
4. ГОСТ 26492-85. Прутки катаные из титана и титановых сплавов. Технические условия. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 31 с.
5. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. — М.: Металлургия, 1976. — 271 с.
6. ГОСТ 8233-56. Сталь. Эталоны микроструктур. — М.: Изд-во стандартов, 2004. — 12 с.
7. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. — М.: Изд-во стандартов, 2003. — 21 с.
8. ГОСТ 1778-70. Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений. — М.: Стандартиформ, 2011. — 30 с.
9. Ващуль Х. Практическая металлография. Методы изготовления образцов. — М.: Металлургия, 1988. — 320 с.
10. Брун М.Я., Шаханова Г.В., Солдатенко И.В., Левин И.В., Селицкая Н.П. О параметрах структуры, определяющих макроструктуру титановых сплавов // Металловедение и обработка титановых и жаропрочных сплавов: Сб. ст. М.: ВИЛС, 1991. С. 128-132 (390 с.)

## ON TITANIUM ALLOYS SEMIPRODUCTS QUALITY CONTROL

Soldatenko I.V.

Moscow Aviation Institute (National Research University),  
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia  
e-mail: iv\_soldatenko@mail.ru

#### Abstract

The goal of the paper consists in titanium alloys semiproducts macrostructure quality evaluation technique improvement.

Active standard ten-point scale of macrostructures was developed based on  $\beta$ -grains of strictly equiaxial shape specific to strain-free state of the alloy of sheet-like intragrain structure.

It is well known, that while checking a macrostructure we can see only those structure elements, which size exceeds 100-150 micron (i. e. the ones exceeding the eye resolution capability).

Macro- and microstructure evaluation of a large number of serial semiproducts and laboratory samples revealed that not only  $\beta$ -grains could be visible on a microstructure, but  $\alpha$ -colonies as well. It was

established, that the shape and size of the grains in the observed macrostructure depended on  $\beta$ -grains and  $\alpha$ -colonies in the microstructure.

Direct dependence of a macrostructure character from its microstructure was revealed. The paper shows that macro grain size and its tonality (degree of brilliance) depend directly on parameters of the microstructure, forming while deformation and heat treatment processes at temperatures of  $\beta$ - or  $\alpha + \beta$ -area. Correlation between the grain maximum longitudinal and diametrical sizes (the degree of non-equiaxiality - K) is clearly associated with physical degree of its deformation. This is another important parameter of macrostructure evaluation besides the grain size itself.

By deformation, the macro grain tonality or its degree of brilliance changes together with the macro grain shape. Interrelation between degree of brilliance of a macrostructure under study and with its microstructure was established.

The author suggests classify a macrostructure according to its tonality (degree of brilliance) by four types:

- *Absolute brilliant* - a typical macrostructure peculiar to alloys with recrystallized or slightly malformed  $\beta$ -grains which size exceeds 100 microns.

- *Brilliant with fog elements* - observed in alloys with medium degree of deformation (10-35%) in  $\alpha + \beta$ -area.

Within one  $\beta$ -grain one can observe micro areas with various degree of  $\alpha$ -phase spheroidizing development (from globular to practically non-spheroidized, plate-like shapes of the particles).

- *Fog with brilliance elements* - peculiar to the alloys malformed in  $\alpha + \beta$ -area to the degree of 40-55%. For the most part this structure is globular or globular plate-like. In some locations it preserves oriented character of  $\alpha$ -phase excreta, which in case of their large size are responsible for appearance of these brilliant locations in the macrostructure.

- *Absolute fog* - corresponds to globular or globular plate-like microstructure.

To improve titanium alloys evaluation objectivity and unambiguity the author suggest introduce quantitative estimation based on three parameters, namely grain size, and the degree of its non-equiaxiality and tonality.

The next step to titanium alloys production quality improvement consists in working out requirements to macrostructure based on quantitative estimation of its parameters.

**Keywords:** titanium alloys, macrostructure, microstructure, structure parameters, grain size, non-equiaxial, tone value.

## References

1. Borisova E.A., Bochvar G.A., Brun M.Ya., Glazunov S.G., Kolachev B.A., Korobov O.S., Mal'kov A.V., Moiseev V.N., Notkin A.B., Pertsovskii N.Z., Pol'kin I.S., Semenova N.M., Solonina O.P., Shakhanova G.V. *Titanovye splavy. Metallografiya titanovykh splavov* (Titanium alloys. Metallography of titanium alloys), Moscow, Metallurgiya, 1980, pp. 18-35 (464 p.).
2. Aleksandrov V.K., Anoshkin N.F., Bochvar G.A., Brun M.Ya., Gel'man A.A., Domnin I.I., D'yakonov Yu.A., Elagina L.A., Ermanok M.Z., Zvereva Z.F., Kaganovich A.Z., Kaganovich I.N., Kazakov K.A., Kushakov S.A., Lovtsov V.M., Lokshin M.Z., Plotnikova T.P., Pol'kin I.S., Sigalov Yu.M., Sobolev Yu.P., Sogrishin Yu.P., Tetyukhin V.V., Usova V.V., Tsapalova N.K. *Polufabrikaty iz titanovykh splavov* (Titanium alloys semiproducts), Moscow, Metallurgiya, 1979, pp. 493-494 (512 p.).
3. Istrakova A.R., Kashapov O.S., Kalashnikov V.S. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2015, vol. 22, no. 2, pp. 142-151.
4. *Prutki katanye iz titana i titanovykh splavov. Tekhnicheskie usloviya, GOST 26492-85* (Titanium and titanium alloys rolled bars. Specifications, State Standard 26492-85), Moscow, Standarty, 1985, 31 p.
5. Saltykov S.A. *Stereometricheskaya metallografiya* (Stereometrical metallography), Moscow, Metallurgiya, 1976, 270 p.
6. *Stal'. Etalony mikrostruktur, GOST 8233-56* (Steel. Microstructure standards, State Standard 8233-56), Moscow, Standarty, 2004, 12 p.
7. *Stali i splavy. Metody vyyavleniya i opredeleniya velichiny zerna, GOST 5639-82* (Steel and alloys. Methods for detection and determination of grain size, State Standard 5639-82), Moscow, Standarty, 2003, 21 p.
8. *Stal'. Metallograficheskie metody opredeleniya nemetallicheskih vklyuchenii, GOST 1778-70* (Steel. Metallographic method for determination of nonmetallic inclusions, State Standard 1778-70), Moscow, Standartinform, 2011, 30 p.
9. Vashul' Kh. *Prakticheskaya metallografiya. Metody izgotovleniya obraztsov* (Practical metallography. Samples making methods), Moscow, Metallurgiya, 1988, 320 p.
10. Brun M.Ya., Shakhanova G.V., Soldatenko I.V., Levin I.V., Selitskaya N.P. *Metallovedenie i obrabotka titanovykh i zharoprochnykh splavov, Sbornik statei*, Moscow, VILS, 1991, pp. 128-132 (390 p.).