

# Transformaciones estructurales en los broncees compuestos con fines tribológicos durante los tratamientos térmicos

B. A. Potekhin, Dr. Prof.<sup>1</sup>, A. S. Khristolyubov Dr.<sup>1</sup>, A.A. Hernandez Ferreira, Dr. Prof.<sup>2</sup>, A.V. Zhilyakov Dr.<sup>3</sup>, V.V. Iliushin Dr.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Estatal de Ingeniería Forestal de los Urales, Ekaterimburgo, Rusia. [pba-nn@yandex.ru](mailto:pba-nn@yandex.ru)

<sup>2</sup>Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”, Cienfuegos, Cuba. [archdez@ucf.edu.cu](mailto:archdez@ucf.edu.cu)

<sup>3</sup>Universidad Federal de los Urales, Ekaterimburgo, Rusia.

**Resumen**— Los materiales compuestos generalmente se obtienen utilizando tecnologías complejas de múltiples etapas. Basados en las propiedades particulares del sistema Cu – Fe y más específicamente en la solubilidad limitada del Fe en Cu (alrededor del 15% a 1300 °C y del 10% a 1200 °C), se empleó esta para obtener dendritas que forman una estructura esquelética ya en la masa fundida (composición BrFe23Ni8Co3Al) durante su enfriamiento y la posterior cristalización en el intervalo de temperaturas 1250-1050°C.

La subsiguiente formación de una estructura fina como resultado de los tratamientos térmicos permitió establecer las regularidades de la formación de la estructura de las dendritas y su endurecimiento por dispersión sólida en dependencia de la composición química de las dendritas, que resultan ser de aceros del tipo maraging (martensito - envejecibles) [1].

**Palabras claves**— transformaciones estructurales, broncees compuestos, tratamientos térmicos

## I. INTRODUCCIÓN

En los broncees destinados para su uso en pares de fricción por deslizamiento con el uso de lubricantes, funciona bien el "principio de Charpy" [2], es decir, en una matriz relativamente blanda, que es una solución sólida sustitución de Cu-Sn, o de Cu-Ni, deben estar presentes inclusiones sólidas, por ejemplo, compuestos intermetálicos SnSb en los babbitts o Cu<sub>31</sub>Sn<sub>8</sub> en los broncees en calidad de superficie de apoyo o soporte. Estos compuestos intermetálicos frágiles durante más de 100 años han proporcionado una buena capacidad de trabajo a estas aleaciones. Por otro lado, estos compuestos intermetálicos influyen negativamente sobre las propiedades mecánicas y tecnológicas. Surgió ahora la posibilidad de reemplazar estas inclusiones por otras en forma de dendritas de aceros martensíticamente envejecibles [3-5].

En este trabajo, se consideran la formación de la morfología de las dendritas y la regulación de su estructura interna mediante métodos de aleación (Sn, Co) y tratamiento térmico.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

Los lingotes de los broncees experimentales con masa de 3 kg se prepararon sobre la base de materias primas puras en atmósfera de monóxido de carbono, su composición química se presenta en la Tabla I.

Tabla I.  
Composición química de los broncees investigados, % en peso

Nº	Bronce	Fe	Ni	Al	Sn	Co
1	BrFe12Ni7Al	12.88	5.98	1.04	-	-
2	BrFe14Ni7Sn3Al	14.17	6.96	1.01	2.51	-
3	BrFe23Ni8Co3Al	22.90	8.18	1.04	-	2.75

## III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La composición química general se determinó a partir de un área de 5 mm<sup>2</sup> y el análisis local de los componentes estructurales se investigó a partir de un área de 3 μm de diámetro utilizando un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 6490-LV con un accesorio para microanálisis Oxford Inca Dry Cool con resolución 133 eV.

Los estudios metalográficos se realizaron en un microscopio óptico Carl Zeiss Axio Observer. La microdureza de los componentes estructurales se determinó en un instrumento PMT-3M con una carga de 50 g. (HV<sup>50</sup>).

La determinación del tamaño de las dendritas y partículas dispersas en el plano de la sección metalográfica se evaluó por la escala de las imágenes de la estructura. El aumento máximo, en nuestro caso, alcanzó 1 • 10<sup>4</sup> veces.

Los broncees estudiados pueden tener dos tipos de macroestructura. Si el contenido total en ellos de Fe, Ni y Co no supera el 25% (Tabla I, posiciones 1, 2), entonces las dendritas en la matriz de cobre están dispuestas de forma caótica, como se muestra en la figura 1. Sin embargo, si el contenido total de Fe, Ni y Co supera el 30% (como en el BrFe23Ni8Co3Al, posición 3 en la tabla I), entonces las dendritas ya formadas en la masa fundida forman un esqueleto rígido regular como se ilustra en la figura 2.

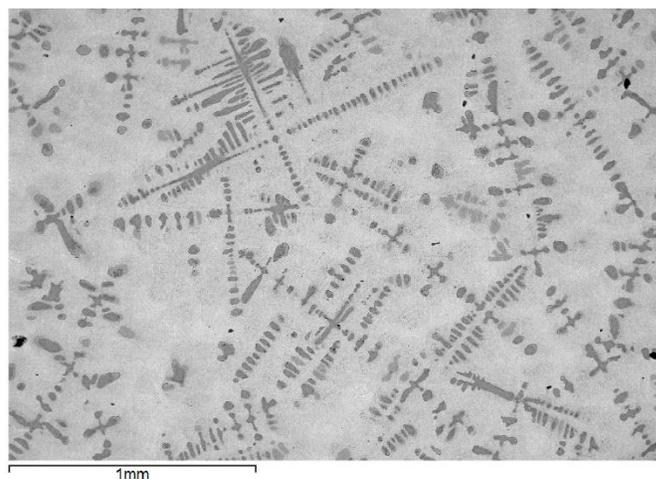


Fig. 1. Distribución caótica de las dendritas en los broncees compuestos con contenido total de Fe, Ni y Co de menos de 25%

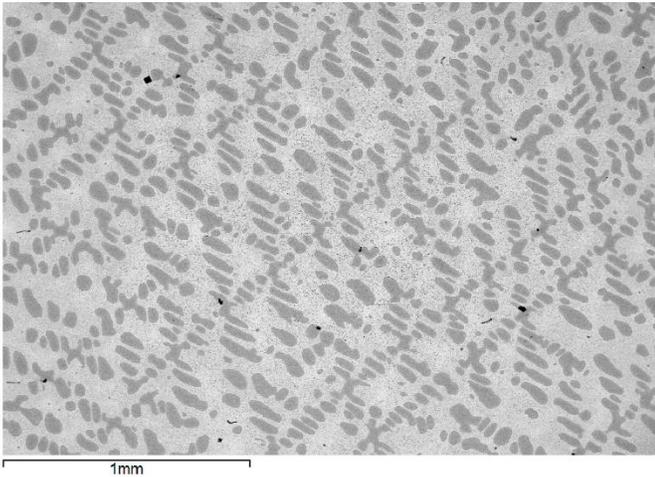


Fig. 2. Esqueleto rígido regular de las dendritas en los bronceos compuestos con contenido total de Fe, Ni y Co superior al 30%.

Durante el enfriamiento posterior del lingote en estado sólido, los procesos de transferencia de masa en el sistema matriz-dendrita están determinados por la baja solubilidad del Fe y el Co en la matriz de cobre, que resulta ser una solución sólida de sustitución Ni, Sn, Al en cobre. La solubilidad del hierro en cobre a temperaturas de 950; 800 y 600 ° C es 1,92; 1.02 y 0.05% en peso, respectivamente [6].

La composición química del componente de hierro de la dendrita para los bronceos No. 2 y No. 3 (Tabla I) corresponde a los aceros Ni20Al y Ni16Co9Al. La microestructura del lingote (Fig. 3) muestra la presencia de dendritas rodeadas por una matriz (la parte clara) en la que se observan inclusiones dispersas uniformemente distribuidas con un tamaño de 0.2–1.5 μm cercanas por su composición a la de la dendrita. Ellas se forman en el proceso de enfriamiento lento del lingote (cae la solubilidad del Fe en Cu) y difunden en la dirección de las dendritas. Después del tratamiento térmico completo, la matriz, en lo fundamental, se libera de estas inclusiones y sólo cerca de las dendritas ( $\leq 3 \mu\text{m}$ ) estas partículas forman una estructura "similar a la perlita" como se puede observar en las figuras 4 y 5, mientras que en el cuerpo de la dendrita se observan capas claras aisladas enriquecidas en Cu y Ni, cercanas por su composición química a la matriz.

Las figuras 6 y 7 ilustran el aspecto brillante de la formación de dendritas en bronce en el proceso de endurecimiento por precipitación a 450 ° C, 2 horas.

En estado fundido, la dendrita resulta ser martensita de composición Fe + 20% Ni, que tiene una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (bcc). El temple desde 950 ° C con un tiempo de mantenimiento de 0.5 horas conduce a la disolución de la parte exterior de la dendrita, y con el envejecimiento posterior a 450 ° C durante 2 horas, a pesar de la pequeña solubilidad de Fe en Cu (<0.05%), estas partículas de Fe disueltas "precipitan" en la superficie de la misma dendrita, formando una cáscara de 3-5 micras de grosor.

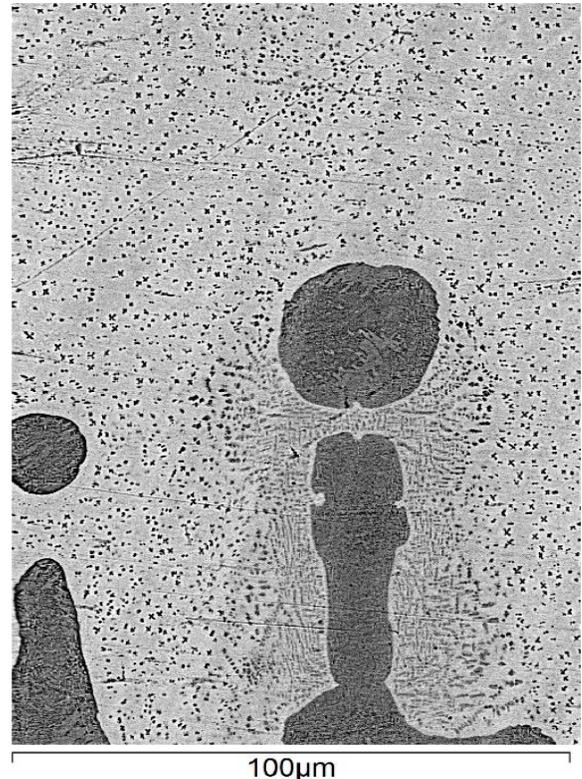


Fig. 3. Microestructura del lingote del bronce BrFe12Ni7Al

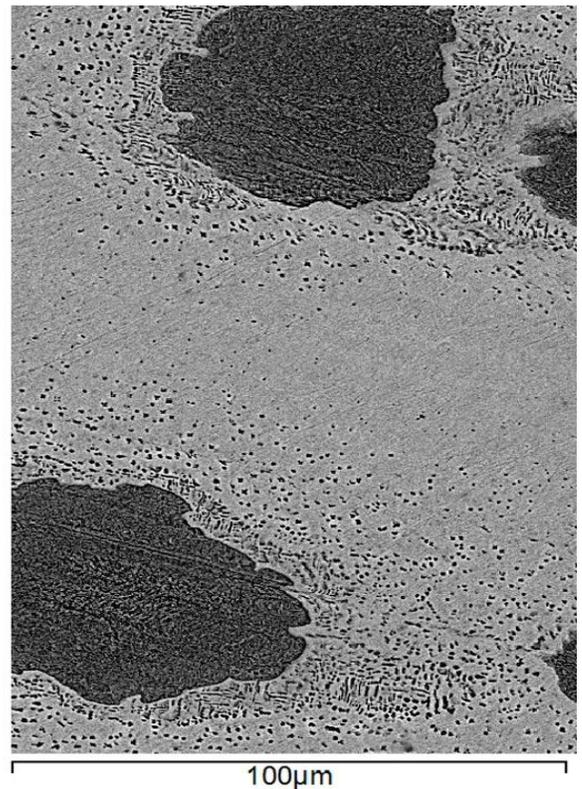


Fig. 4. Microestructura del bronce BrFe12Ni7Al luego de temple desde 950 °C, 1 hora y envejecimiento a 450 °C, 2 horas

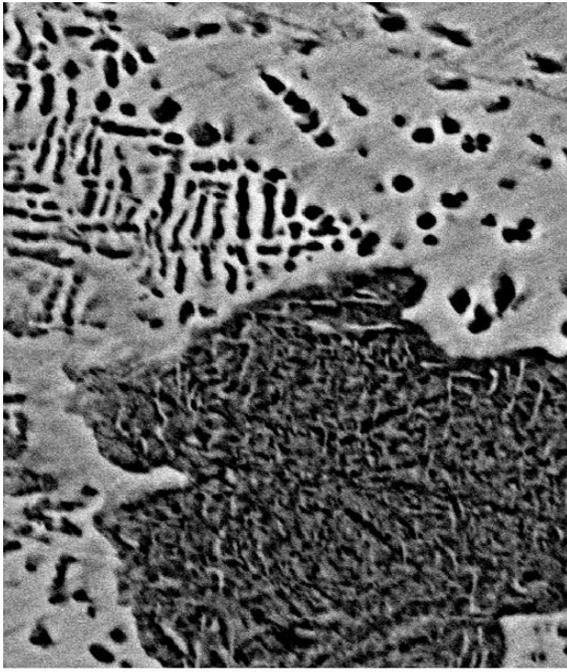


Fig. 5. Microestructura interna de la dendrita del bronce BrFe12Ni7Al luego de temple desde 950 °C, 1 hora y envejecimiento a 450 °C, 2 horas

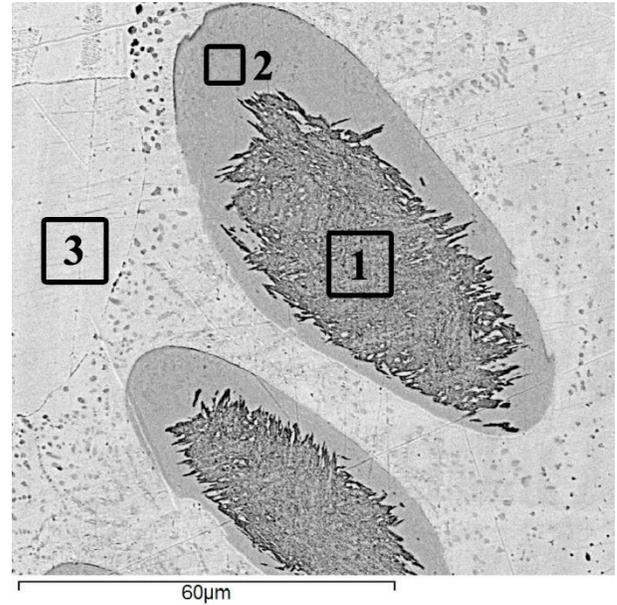


Fig.7. Microestructura de la dendrita en el bronce BrFe14Ni7Sn2Al luego de temple desde 950 °C, 0,5 hora seguido de envejecimiento a 450 °C, 2 horas

Así, después de un tratamiento térmico completo, la parte central de la dendrita se convierte en martensítica con red cúbica centrada en el cuerpo (bcc), la cáscara es austenítica con red cúbica centrada en las caras (fcc) y la matriz prácticamente se libera de las inclusiones de hierro, solo las zonas con aspecto similar a la perlita permanecen a una distancia de 3 μm de la superficie dendrítica (Fig.7).

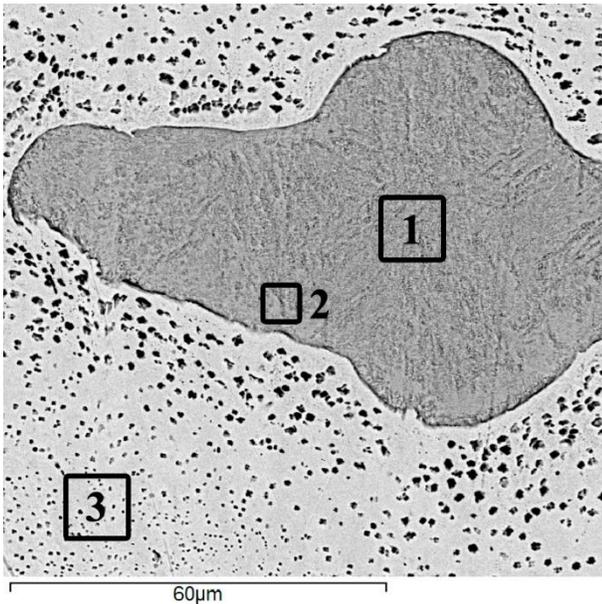


Fig.6. Microestructura de la dendrita en el bronce BrFe14Ni7Sn2Al en el lingote sin tratamiento térmico

La composición química de esta capa parece una solución sólida de sustitución de Ni (17.6%) y Cu (19.7%) en hierro (ver Tabla II). No se observan inclusiones en esta capa, y la solubilidad del Cu en Fe es insignificante. Aparentemente, en nuestro caso, los nanoclusters (Fe - Ni - Al) se forman en la cáscara. Un fenómeno similar ya había sido observado anteriormente [7-8].

TABLA II  
Redistribución de elementos de aleación entre la dendrita y la matriz durante los tratamientos térmicos.

Régimen de tratamiento térmico	Zona en fig. 6 y fig. 7	Contenido medio del elem. químico, % en peso.				
		Cu	Fe	Ni	Sn	Al
Lingote sin tratamiento térmico	1	20,35	64,09	14,84	-	0,72
	2	21,67	59,83	17,15	0,36	0,99
	3	91,61	1,33	2,77	3,48	0,81
Luego de temple y envejecimiento	1	19,76	65,03	14,50	-	0,71
	2	19,67	61,77	17,61	-	0,95
	3	89,13	2,79	3,79	3,46	0,82

En otros bronce compuestos (como el BrFe23Ni8Co3Al), la microestructura interna de las dendritas tiene un aspecto diferente (ver Fig. 8). En el lingote, en el cuerpo de las dendritas, se forman zonas ricas en cobre de forma laminar con una sección transversal de 0.2 μm. En el proceso de temple desde 950 °C y su posterior envejecimiento a 450 °C, estas zonas se vuelven globulares (ver Fig. 9 y 10).

Las dendritas de todos los bronce tienen una dureza suficientemente alta (ver Tabla III) ya en el lingote, puesto que durante la cristalización se forman los compuestos intermetálicos quebradizos FeAl y Cu<sub>31</sub>Sn<sub>8</sub>.

TABLA III

Micro dureza  $HV^{50}$  de las dendritas de los bronce BrFe12Ni7Al (a), BrFe14Ni7Sn3Al (b) y BrFe23Ni8Co3Al (c) en dependencia del régimen de tratamiento térmico.

№	Régimen de tratamiento térmico	Bronces compuestos		
		a	b	c
1	Lingote sin tratamiento térmico	410	426	372
2	Temple desde 950 °C, 1 h	203	384	371
3	Temple + envejecimiento a 450 °C, 2 horas.	335	461	511

Después del tratamiento térmico, estos compuestos intermetálicos se disuelven parcialmente y luego se forman otros como el NiAl, (Ni,Co)<sub>3</sub>Al, como es el caso de los aceros del tipo "maraging" [1].

Un alto grado de endurecimiento puede ser activado por la presencia de Co.

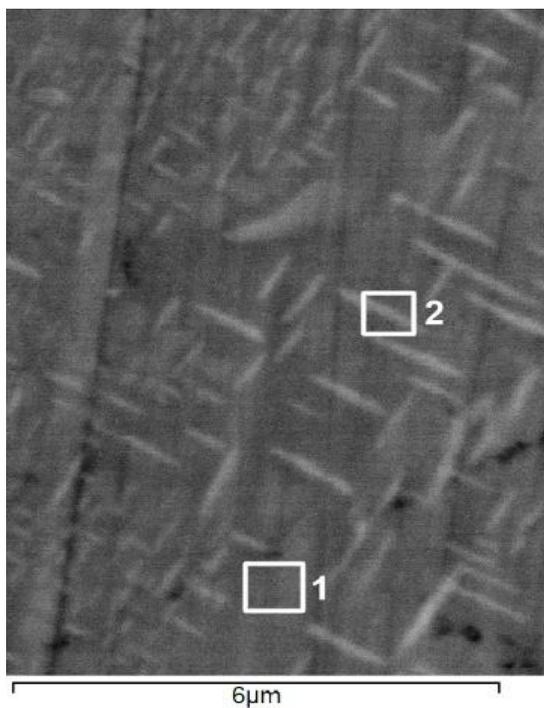


Fig. 8. Microestructura interna de la dendrita en forma laminar en el lingote de los bronce tipo BrFeNiCoAl

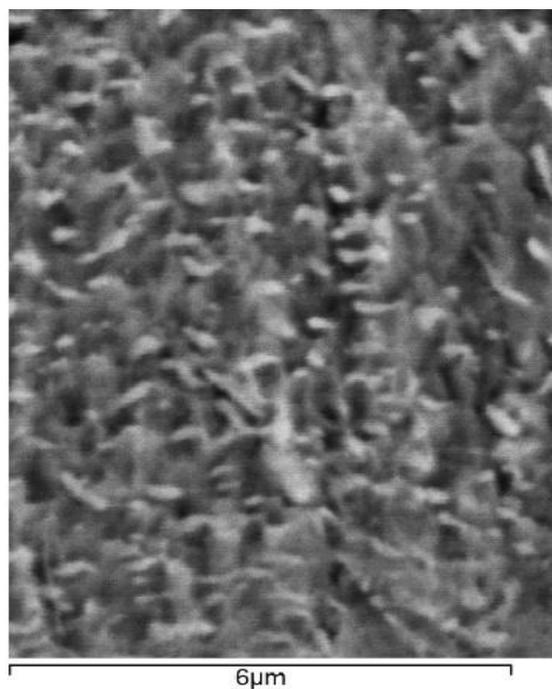


Fig. 9. Microestructura interna de la dendrita en forma globular en los bronce tipo BrFeNiCoAl después del temple desde 950 °C, 1 hora.

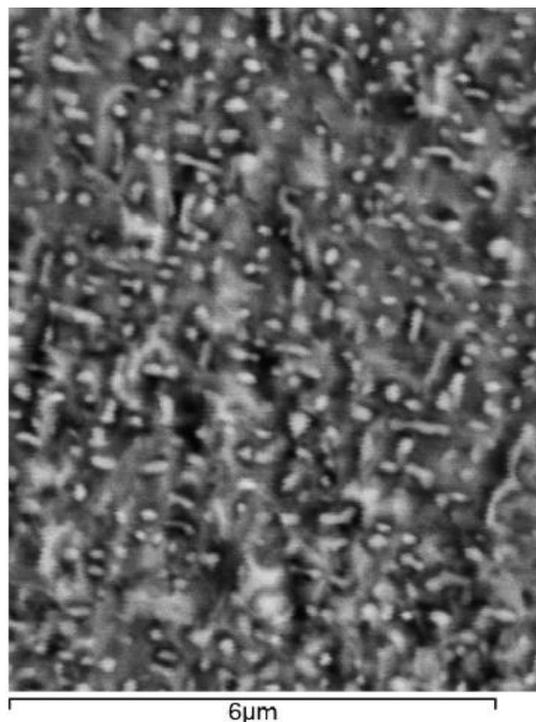


Fig. 10. Microestructura interna de la dendrita en forma globular en los bronce tipo BrFeNiCoAl después del temple desde 950 °C, 1 hora y el envejecimiento a 450 °C, 2 horas.

#### IV. CONCLUSIONES

La investigación realizada mostró que los bronce compuestos pueden obtenerse fácilmente directamente en el proceso de fabricación de lingotes y piezas fundidas.

Las transformaciones de fase, los cambios morfológicos durante los tratamientos térmicos son diversos. Las formas de influencia en las propiedades mecánicas, tecnológicas y tribológicas son múltiples.

El nivel de resistencia al desgaste de algunas composiciones de bronce compuestos es alto y no tiene análogos después de las aleaciones de deslizamiento a base de cobre [9].

#### REFERENCIAS

- [1] Ya.M. Potak. Acero de alta resistencia, Moscú, Metallurgia, 1972. (En ruso).
- [2] Ya.M. Potak, E.A. Sagalevich. Diagrama estructural de aceros inoxidables deformados. Metallografia y termicheskaya obrabotka metallov. No. 9, pp. 12-16, 1971. (En ruso)
- [3] E.A. Matsin. Regla de Sharpy y microrelieve de las superficies de las aleaciones antifricción. Materiales de la Segunda Conferencia de toda la URSS sobre fricción y desgaste en las máquinas. Moscú. Editorial Academia Nauk USSR, T3, pp. 222-229, 1948. (En ruso)
- [4] Potekhin B., Hernández A., Khristolyubov A., Ilushin V. Formación de la estructura y propiedades de los bronce Fe-Ni-Al. *CIM 2011 – VI Congreso Internacional del Materiales*. 27-30 Noviembre de 2011, Bogotá D.C., Colombia.
- [5] Y.Y. Chuang, R. Schmid, and Y.A. Chang. Calculation of the equilibrium phase diagrams and the spinodally decomposed structures of the Fe–Cu–Ni system. *Acta Mater.* No. 8. pp. 1369–1380, 1985.
- [6] K.P. Gupta. The Cu–Fe–Ni (Copper–Iron–Nickel) system. *Phase Diagram of Ternary Nickel Alloys*. No. 1. pp. 290–315, 1990.
- [7] N.P. Liakishev. Diagramas de estado de sistemas metálicos binarios. Manual en tres tomos. Tomo 2. Moscú. Mashinostroenie, 1997. (En ruso).
- [8] Potekhin B.A., Ilyushin V.V., Khristolyubov A.S., Zhilyakov A.Yu, and Hernández A. Creation of composite bronze – maraging stell alloy. *Metal Science and Heat Treatment*, Vol 55, Nos. 5-6, September, 2013.
- [9] Potekhin B.A., Ilyushin V.V., Khristolyubov A.S., Zhilyakov A.Yu. Formation of structure and properties of composite bronzes reinforced by steel dendrites. *The Physics of Metals and Metallography*. 2014. T. 115. № 4. C. 413-419.
- [10] Potekhin B.A., Khristolyubov A.S., Zhilyakov A.Yu. Development of Composite Bronzes Reinforced by Steel Dendrites // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*/ 2018. Vol. 59, No. 5. pp. 527-532