

Influence of the microstructure dispersion on the tribological properties of composite bronzes reinforced with steel dendrites

B. A. Potekhin, Dr. Prof.¹, A.A. Hernandez Fereira, Dr. Prof.², A. S Khristolyubov Dr.¹ V.V. Iliushin Dr.¹

¹Universidad Estatal de Ingeniería Forestal de los Urales, Ekaterimburgo, Rusia. pba-nn@yandex.ru

²Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba. archdez@ucf.edu.cu

Abstract -- The possibility of creating composite bronze reinforced with martensitic and austenitic-ferritic stainless steel dendrites is considered. Compared to BrSn10 bronze, widely used in sliding friction pairs, BrFe12Ni7Al, BrFe12Ni7Cr5Si bronzes have a high complex of mechanical, technological and particularly tribological properties. For similar values of the coefficient of friction, the wear resistance of bronze BrFe12Ni7Al is a higher order. Unlike the classic bronze BrSn10, composite bronzes can be obtained in hot deformed state, deposited on steel and cast iron. The level of mechanical properties: $\sigma_{0.2} = 220$ MPa; $\sigma_B = 295$ MPa; $\psi = 38\%$ is 1.5 to 3 times higher than that of the BrSn10. At the laboratory level for the first time the possibility of creating an industrial variant of composite steel with a particularly high level of tribological properties is based.

Keywords – composite bronze, mechanical and tribological properties, martensitic steel, austenitic-ferritic stainless steel.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.532>
ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

Influencia de la dispersión de la microestructura en las propiedades tribológicas de los broncees compuestos reforzados con dendritas de acero.

B. A. Potekhin, Dr. Prof.¹, A.A. Hernandez Fereira, Dr. Prof.². A. S Khristolyubov Dr.¹ V.V. Iliushin Dr.¹

¹Universidad Estatal de Ingeniería Forestal de los Urales, Ekaterimburgo, Rusia. pba-nn@yandex.ru

²Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba. archdez@ucf.edu.cu

Resumen– Se considera la posibilidad de crear broncees compuestos reforzados con dendritas de aceros martensíticos y austenítico-ferríticos inoxidable. En comparación con el bronce BrSn10, ampliamente utilizado en pares de fricción por deslizamiento, los broncees BrFe12Ni7Al, BrFe12Ni7Cr5Si poseen un elevado complejo de propiedades mecánicas, tecnológicas y particularmente tribológicas. Para valores similares del coeficiente de fricción, la resistencia al desgaste del bronce BrFe12Ni7Al es, en un orden, más alta. A diferencia del bronce clásico BrSn10, los broncees compuestos pueden ser obtenidos en estado deformado en caliente mediante depósitos sobre acero y hierro fundido. El nivel de propiedades mecánicas: $\sigma_{0,2} = 220$ MPa; $\sigma_B = 295$ MPa; $\psi = 38$ % es de 1,5 a 3 veces superior que el del BrSn10. A nivel de laboratorio, por primera vez, está fundamentada la posibilidad de creación de una variante industrial de bronce compuesto con un nivel particularmente alto de propiedades tribológicas.

Palabras claves-- bronce compuesto, propiedades mecánicas y tribológicas, acero martensítico, acero austenítico-ferrítico inoxidable

I. INTRODUCCIÓN

Los broncees en base a estaño tipo BrSn10 son bien recomendados en los pares de fricción por deslizamiento como aleaciones anti fricción por deslizamiento. Sin embargo, la presencia en ellos de compuestos intermetálicos del tipo Cu₃₁Sn₈ no permite deformarlos, ni en caliente, ni en frío, lo cual restringe el campo de su aplicación racional [1]. La soldadura y los depósitos restauradores son muy difíciles de lograr ya que los compuestos intermetálicos frágiles a todas las temperaturas de su existencia, tienen una forma desfavorable de finas agujas.

La plasticidad tecnológica del bronce BrSn10 se puede hacer satisfactoria disolviendo y transfiriendo los compuestos intermetálicos gruesos y quebradizos a una solución sólida α (Cu-Sn). Esto viola la regla de Charpy-Bochvar (para las aleaciones antifricción) y el bronce pierde completamente sus propiedades de servicio, o sea, las propiedades tribológicas.

Los intentos de mejorar la morfología de los intermetálicos con la aleación complementaria del bronce BrSn10 con Ni y Co no dieron resultados positivos y se decidió sustituir los compuestos intermetálicos Cu₃₁Sn₈ por dendritas de acero, cuya formación en la aleación binaria Cu-Fe es conocida [2-6].

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Los lingotes de los broncees experimentales con diámetro 65 mm y altura 120 mm (peso aproximado de 3 kg) fueron

preparados mediante la fusión de materias primas puras en un horno de fundición Tamman en crisoles de alúmina y en atmósfera reductora de monóxido de carbono.

Posteriormente fueron preparadas, por fundición al vacío, varillas de 7 mm de diámetro, cuya velocidad de cristalización y enfriamiento era cercana a los 700 °C/s. Además, algunas piezas fundidas de los broncees investigados fueron refundidas con electrodos de tungsteno en atmósfera de argón a una profundidad de 5 mm.

La composición química de los broncees experimentales aparece en la tabla I.

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

Nº	Bronce	Fe	Ni	Al	Cr	Si
fundición convencional, velocidad de cristalización < 5 °C/s						
1	BrFe12Ni7Al	12,88	5,98	1,04	-	-
2	BrFe12Ni7Cr5Si	12,35	7,46	-	3,97	1,15
fundición al vacío, velocidad de cristalización > 700 °C/s						
3	BrFe12Ni7Al	11,85	7,43	0,48	-	-
4	BrFe12Ni7Cr5Si	12,35	7,14	-	5,77	1,01

Notas: 1) el resto Cu; 2) la cantidad de impurezas no rebasa 0,30%, S y P \leq 0,02 % ambos.

El análisis químico local se realizó en el microscopio de rastreo Jeol JSM 6490-LV con la instalación para microanálisis Oxford Inca Dry Cool (resolución 133 eV). El análisis químico general se determinó en áreas de 1 mm², como el valor promedio de tres o más mediciones

El tratamiento térmico de las muestras investigadas se llevó a cabo en el horno de cámara SNOL 8.2/1100, cuyas desviaciones de la temperatura dada no excedía \pm 5°C.

La cantidad de dendritas por su área relativa en las superficies de las secciones metalográficas de las muestras se determinó por el método contenido en [7].

La micro dureza de los componentes estructurales de las aleaciones fundidas y tratadas térmicamente se midió en los equipos PMT-3M y 402MVD con cargas de 0,5N.

Las características mecánicas de las aleaciones se determinaron durante la tracción de 5 muestras estándar con diámetro de 5 mm en la zona de trabajo a temperatura ambiente en la máquina de ensayo Instron 3382.

El coeficiente de fricción y la intensidad de desgaste se determinaron en una instalación especial montada sobre la base de una máquina herramienta con mando numérico (CNC). El ensayo se llevó a cabo según el esquema disco-muestras en forma de dedos con registro computarizado continuo de los parámetros del ensayo (presión, velocidad de deslizamiento,

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.532>

ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

temperatura). En cada experimento se usaron tres muestras de dimensiones 6x6x12 mm y como contra cuerpo un disco de acero del tipo usado para cojinetes de bolas y de rodillos IIX15 (0,95-1,05% C, 1,30-1,65% Cr) con dureza de 45 HRc. El método de ensayo está descrito en detalle en el trabajo [8].

Para la modelación de la influencia del lubricante en la formación del micro relieve en el proceso de fricción se empleó la interacción por cavitación en agua sobre la superficie de los broncees BrSn10 y BrFeNiCrSi 12-7-5-1 durante 1-5 minutos a la frecuencia de 20 kHz y potencia de 500 W.

Los parámetros del micro relieve se investigaron en el interferómetro óptico modelo WYKO NT1100, que permite con una precisión hasta los nanómetros determinar el relieve tridimensional de la superficie, realizando la medición de la rugosidad de la misma.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La poca solubilidad del Fe y el Co en el Cu en estado sólido: 1,92 y 3,5% at. a 950 °C y menos de 0,5% at. a 600 °C, respectivamente predetermina la formación en el proceso de cristalización de las dendritas, cuya base la componen el Fe, el Ni y el Co. La cristalización de las dendritas de hierro comienza a temperaturas cercanas a 1250 °C, a tal temperatura la solubilidad del Cu en γ Fe (hierro gamma) llega hasta 10 % at. [9].

El tamaño de las dendritas en los lingotes de 2 kg de peso alcanza 15-20 μ m (fig. 1, a).

A alta velocidad de cristalización y enfriamiento de la fundición (700 °C/s) el tamaño de las dendritas disminuye en un orden. A diferencia de los compuestos intermetálicos tipo $Cu_{31}Sn_8$, las dendritas de acero tienen una forma satisfactoria conveniente, lo que, como regla, influye en las propiedades mecánicas y tecnológicas.

La introducción en el bronce de cromo en cantidad de 5% (BrFeNiCrSi 12-7-5-1) transforma la dendrita en estado austenítico-ferrítico. La composición química de la dendrita y su matriz se presentan en la tabla II. En este caso el Cr, que es un elemento ferritizador se disuelve en el Fe y la presencia de un 15% de Ni en la dendrita trabaja, por su esencia como austenitizador [10, 11].

Tabla II Composición química de la dendrita y la matriz del bronce BrFeNiCrSi 12-7-5-1 para diferentes tipos de fundición.

Tipo de fundición	Región analizada	Contenido medio de elemento químico, % en peso				
		Cu	Fe	Ni	Cr	Si
fundición normal	dendrita	8,13	56,73	15,98	16,58	2,57
	matriz	94,81	1,31	3,39	0,29	0,20
fundición al vacío	dendrita	10,70	54,17	13,04	21,44	0,65
	matriz	89,47	3,22	5,13	1,02	1,16

De acuerdo con la regla Charpy-Bochvar [12] las aleaciones de deslizamiento deben incluir fases sólidas duras y matriz blanda. Un ejemplo claro de esto es el ampliamente empleado bronce BrSn10. En los broncees compuestos, reforzados con dendritas de aceros de diferentes clases, se

analizó la influencia de la microestructura de las dendritas, su dispersión y micro dureza en las principales propiedades tribológicas. En la figura 3 aparecen las dependencias del coeficiente de fricción de la presión en la zona de contacto para los broncees experimentales y el BrSn10. Los valores de dichos coeficientes y de la intensidad de desgaste aparecen en la tabla III para diferentes microestructura y micro dureza de las dendritas.

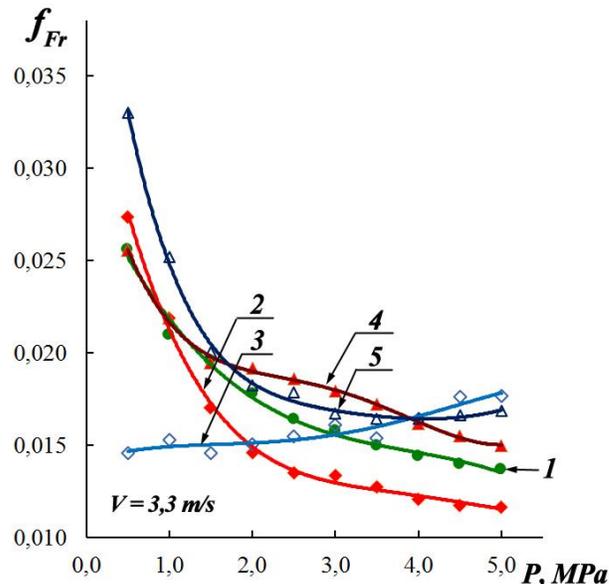


Fig. 2. Coeficiente de fricción de los broncees compuestos obtenidos por vaciado (curvas 2, 4) y succión al vacío (curvas 3, 5).

1 – BrSn10; 2, 3 – BrFeNiCrSi 12-7-5-1; 4, 5 – BrFeNiAl 12-7-1

Tabla III. Dependencia del coeficiente de fricción (f_{Fr}) y la intensidad de desgaste (I) y el cambio en la rugosidad (ΔRa) de los broncees investigados de la microestructura de las dendritas y su micro dureza.

Nº	Composición del bronce, fundido	Composición de la dendrita (superficie de apoyo)	Sección de la dendrita μ m	HV ⁵⁰	f_{Fr} , con P=3 MPa, v=3,3 m/s	I, μ m/km	ΔRa , μ m
fundición convencional, velocidad de cristalización < 5 °C/s							
1	BrSn10	$Cu_{31}Sn_8$		401	0,016	0,025	0,04
2	BrFeNiAl 12-7-1	martensita endurecida por envejecimiento	20-100	338	0,018	0,026	0,24
3	BrFeNiCrSi 12-7-5-1	austenita inoxidable	20-30	189	0,013	0,006	0,12
fundición al vacío, velocidad de cristalización > 700 °C/s							
4	BrFeNiAl 12-7-1 fundición al vacío	martensita	2-5	< 200	0,017	0,002	
5	BrFeNiCrSi 12-7-5-1 fundición al vacío	austenita-ferrita inoxidable	5-10	< 200	0,016	0,001	

Notas: 1) posiciones 1-3 – lingotes de peso 2 kg, posiciones 4 y 5 – varillas con $\varnothing=7\text{mm}$, longitud 600 mm, obtenidas por fundición al vacío; 2) la micro dureza de las dendritas en los bronce (posiciones 4 y 5) no fue determinada debido a su alta dispersión, pero, según nuestra opinión, no puede ser superior a 200 HV⁵⁰; 3) la micro dureza de la matriz para diferentes bronce se encuentra en los límites 100-120 HV⁵⁰

Los datos experimentales presentados en la tabla III muestran que la dureza de la superficie de apoyo (dendritas de acero, intermetálicos en el BrSn10) no influye significativamente en el coeficiente de fricción el cual se encuentra en el intervalo 0,013-0,018, mientras que la resistencia al desgaste varía en amplios límites desde 0,001 hasta 0,025 $\mu\text{m}/\text{km}$.

Al mismo tiempo, es precisamente la resistencia al desgaste la que determina la fiabilidad y durabilidad de los pares de fricción por deslizamiento.

En la figura 3 se muestra el aspecto de la topografía de la superficie del bronce BrFeNiCrSi 12-7-5-1 luego de ser sometida a la interacción por cavitación en agua con el propósito de modelar el proceso de formación del micro relieve producto de la interacción de la superficie de los bronce con el lubricante. Como se puede apreciar al comparar el patrón de colores de la superficie con el de la leyenda (a la derecha) sobre la misma prevalece una rugosidad relativamente alta. Allí también se muestran las dos direcciones a través de las cuales se midió la rugosidad de la superficie cuyos perfiles aparecen en la figura 4 para las direcciones X e Y respectivamente.

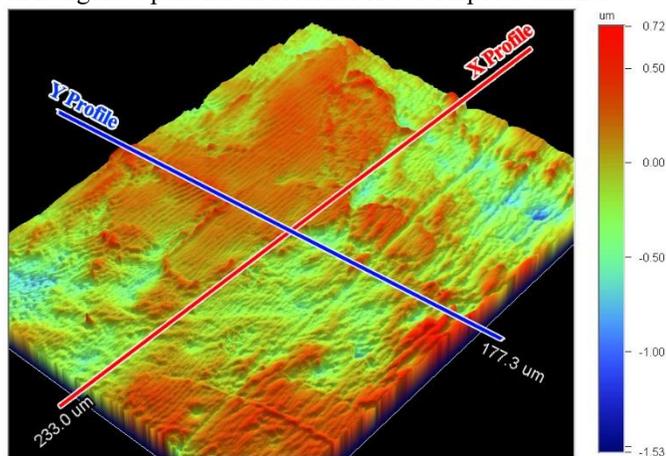


Fig. 3. Topografía de la superficie desarrollada producto de la interacción por cavitación sobre el bronce BrFeNiCrSi 12-7-5-1 con las direcciones según las cuales se realizaron los perfiles de rugosidad.

La evaluación de la formación del micro relieve en el proceso de interacción por cavitación mostró que el indicador de rugosidad Ra luego de 5 minutos de cavitación crece desde 0,020 (en el estado inicial) hasta 0,056, o sea, $\Delta\text{Ra} = 0,036 \mu\text{m}$,

y para el bronce compuesto BrFeNiCrSi 12-7-5-1 desde 0,12 hasta 0,24, $\Delta\text{Ra} = 0,12 \mu\text{m}$ al tiempo que la resistencia al desgaste del bronce compuesto creció en 4 veces

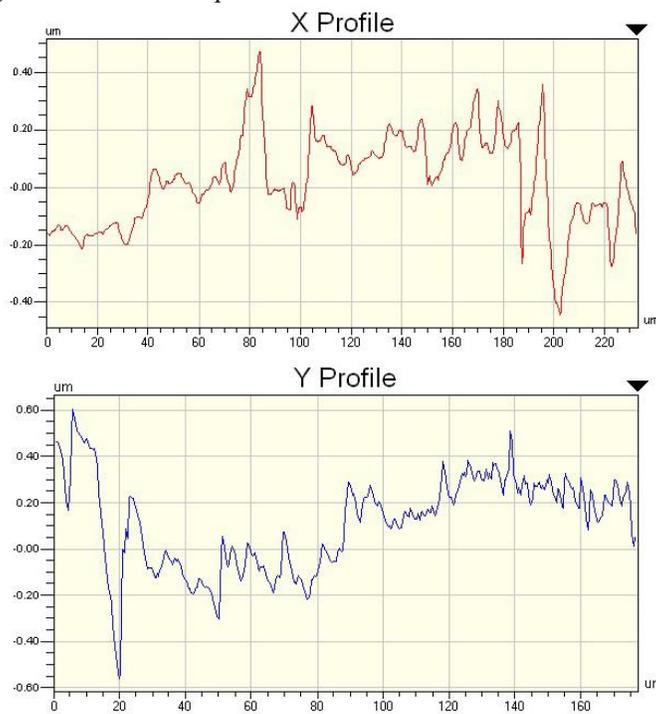
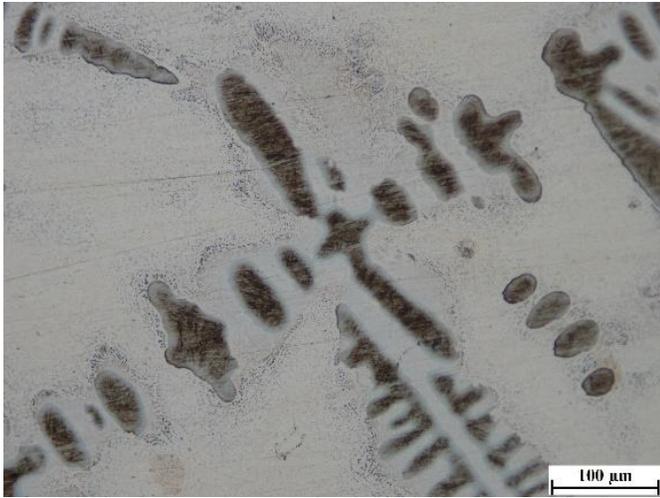


Fig. 4. Perfiles de rugosidad en las direcciones X e Y, mostrados en la figura 3.

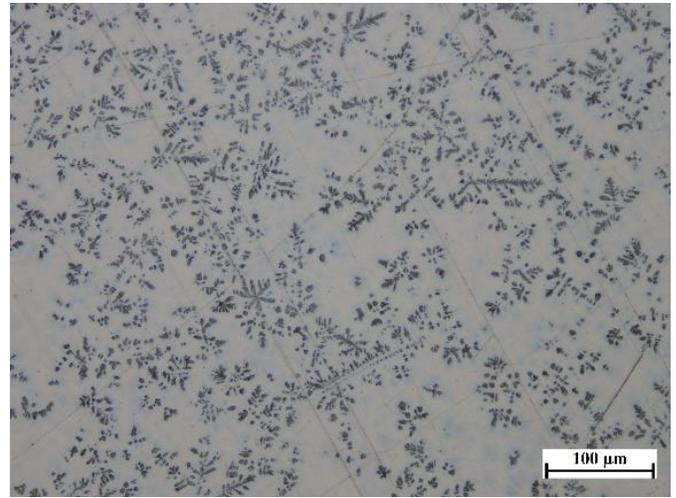
En nuestra opinión, la causa de la alta resistencia al desgaste radica en que las dendritas de acero tienen inclusiones blandas de Cu, y en la matriz hay inclusiones dispersas duras de acero [13, 14]. En el proceso de los ensayos tribológicos la interacción hidráulica del aceite forma sobre la superficie de fricción por deslizamiento un micro relieve acumulador de aceite, el cual garantiza una muy alta resistencia al desgaste de los bronce compuestos, particularmente en estado disperso (posiciones 4 y 5 en la tabla III).

Particularmente alta es la resistencia al desgaste del bronce compuesto BrFeNiCrSi 12-7-5-1 (posición 5, tabla III) en el cual las dendritas resultan con la composición de un acero inoxidable Cr23Ni15Si1, “recubiertas” por óxidos duros del tipo $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{O}_3$.

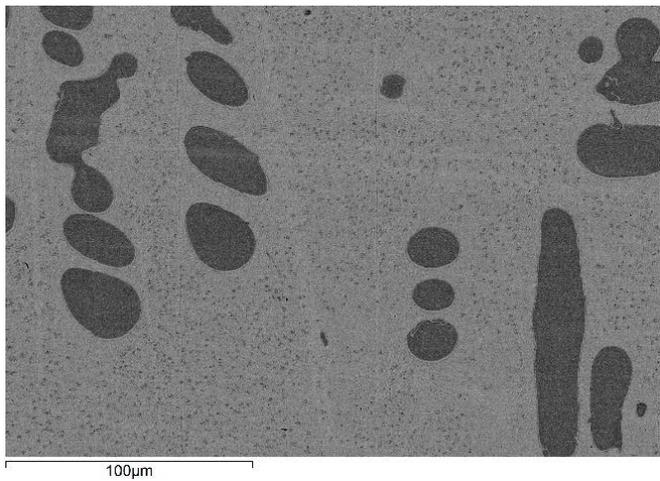
Las propiedades mecánicas del bronce compuesto BrFeNiAl 12-7-1 son significativamente superiores que las del bronce BrSn10, particularmente en las propiedades plásticas, incluso en forma de lingotes sin ningún tipo de tratamiento térmico (posición 2 en la tabla IV).



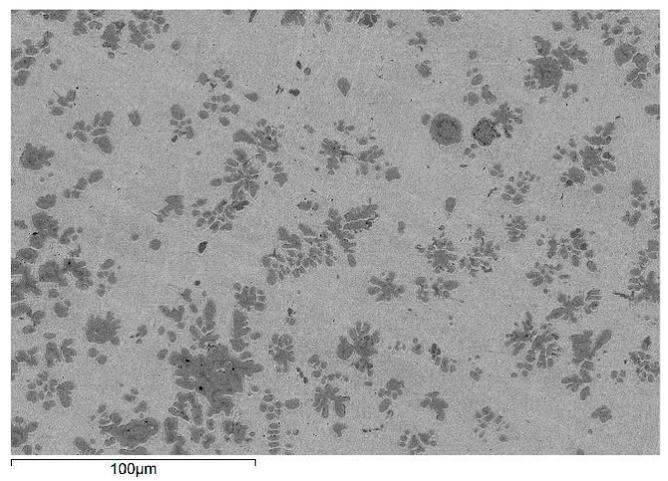
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 1. Particularidades morfológicas de la microestructura de los aceros compuestos en dependencia de la tecnología de su fabricación:
a) Bronce BrFeNiAl 12-7-1 lingote de 2 kg obtenido por fundición convencional;
b) Bronce BrFeNiAl 12-7-1 varilla de Ø 7 mm obtenida por fundición al vacío;
c) Bronce BrFeNiCrSi 12-7-5-1 lingote 2 kg obtenido por fundición convencional;
d) Bronce BrFeNiCrSi 12-7-5-1 varilla de Ø 7 mm obtenida por fundición al vacío.

Tabla IV. Propiedades mecánicas de los bronce compuestos después de diferentes tratamientos.

№	Composición del bronce	Régimen de tratamiento	Propiedades mecánicas				
			$\sigma_{0,2}$, MPa	σ_B , MPa	ψ , %	δ_s , %	δ_p , %
fundición convencional, velocidad de cristalización < 5 °C/s							
1	BrSn10	ninguno	170	215	10-14	3-10	< 1
2	BrFeNiAl 12-7-1	ninguno	170	364	42,8	38,2	20,3
3	BrFeNiAl 12-7-1	temple 950 °C, 30 min, agua	147	300	69,5	66,9	34,2
4	BrFeNiAl 12-7-1	temple + envejecimiento 450 °C, 2 h	149	301	39,4	51,4	39,3
fundición al vacío, velocidad de cristalización > 700 °C/s							
5	BrFeNiAl 12-7-1	ninguno	220	295	38,5	16,0	6,4
6	BrFeNiCrSi 12-7-5-1	ninguno	173	288	14,1	16,9	-

Notas: posiciones 1-4 lingote de peso 3 kg y diámetro 50 mm; posiciones 5 y 6 – varilla de diámetro 7 mm, obtenida por fundición al vacío.

Además, a diferencia del bronce BrSn10, ampliamente utilizado en la construcción de maquinarias, los bronce compuestos se depositan bien sobre el acero y el hierro fundido que son más ecológicos debido a la ausencia de estaño [15].

IV. CONCLUSIONES

Las investigaciones realizadas a nivel de laboratorio fundamentan la racionalidad de crear variantes industriales de bronce compuestos con resistencia al desgaste particularmente alta en las condiciones de fricción por deslizamiento.

El elevado nivel de las propiedades mecánicas y tecnológicas permite usar los bronce compuestos reforzados por dendritas de acero de diferentes clases tanto en estado fundido como deformado en caliente, o sea, ampliar su área de aplicación en comparación con el bronce “prototipo” BrSn10.

La mejor variante de tales bronce, como mostraron las investigaciones, resultó ser el bronce BrFeNiAl 12-7-1.

REFERENCIAS

- [1] B.N. Arzamasov. Materiales de construcción. Manual. Moscú, Mashinostroenie, 1990. (En ruso)
- [2] Y.S Avramov, A.D. Schliapin. Aleaciones en base de sistema con solubilidad limitada en estado líquido. Moscú, Intercontact Nauka. 2002. (En ruso)
- [3] C.P. Wang, X.J. Liu, I. Ohnuma, R. Kainuma, K. Ishida. Thermodynamic database of the phase diagrams in Cu–Fe base ternary systems. *J. Phase Equilib. Diffus.* Vol 25, No. 4, pp. 320–328, 2004.
- [4] M. Baricco, E. Bosco, G. Acconciaio, P. Rizzi, M. Coisson. Rapid solidification of Cu–Fe–Ni alloys. *Mater. Sci. Eng. A.* pp. 375–377, pp. 1019–1023, 2004.
- [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] S.A. Saltykov. Metalografía estereométrica. Moscú, Metallurgia. 1970. (En ruso)

- [8] B.A. Potekhin, V.V. Iliushin, A.S. Kristoliubov. Propiedades peculiares del babbitt B83 obtenido por el método de fundición turbulenta. *Litió y metalurgia*, 57, No. 3, pp. 78-81, 2010. (En ruso)
- [9] N.P. Liakishev. Diagramas de estado de sistemas metálicos binarios. Manual en tres tomos. Tomo 2. Moscú. Mashinostroenie, 1997. (En ruso).
- [10] Ya.M. Potak. Acero de alta resistencia, Moscú, Metallurgia, 1972. (En ruso).
- [11] Ya.M. Potak, E.A. Sagalevich. Diagrama estructural de aceros inoxidable deformados. *Metallografía y termicheskaya obrabotka metallov.* No. 9, pp. 12-16, 1971. (En ruso)
- [12] 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)
- [13] B.A. Potekhin, V.V. Iliushin, A.S. Kristoliubov, A.Yu. Zhilyakov. Formación de la estructura de los bronce compuestos reforzados con dendritas de acero. *Fizica Metallov y Metallovedenie.* Tomo 115, No. 4, pp. 442-448, 2014. (En ruso)
- [14] B.A. Potekhin, A.S. Khristolyubov, A.A. Hernandez Ferreira. New class of composite bronze, armed with steel dendrites for antifricción technique. In *Proceedings XXIV International Scientific Conference Trans & Motauto 16 Varna Bulgaria*, vol.1, pp. 36-38, June 2016.
- [15] V.I. Shumakov et al. Alambre de polvo para la obtención de recubrimientos anti fricción. Patente de Rusia a un modelo útil. №170923 RU. 2017. Boletín № 14. (En ruso)