**X International Conference on Mechanical Engineering**

**“COMEC 2019”**

**Valoraciones cristaloquímicas del NbCx precipitados en depósitos del tipo fundición blanca del sistema Fe-Cr-C-Nb**

*Crystallochemical Assessments of NbCx precipitated in white cast iron wed deposits of the Fe-Cr-C-Nb system*

Rafael Quintana-Puchol1,2, Amado Cruz Crespo2 y Rafael Fernández Fuente2

1. Dpto. Licenciatura en Química, Facultada de Química y Farmacia, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villa, Cuba, e-mail: [rquin@uclv.edu.cu](mailto:rquin@uclv.edu.cu)
2. Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS), Facultad de Ingeniería Mecánica e Industriales, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villa, Cuba, e-mail: [acruz@uclv.edu.cu](mailto:acruz@uclv.edu.cu) y [rffernandez@uclv.edu.cu](mailto:rffernandez@uclv.edu.cu)

**Resumen:** En este trabajo se aborda una valoración sobre las características cristaloquímicas de los carburos de niobio complejos en depósitos de recargue de fundiciones blancas aleadas del sistema Fe-Cr-C-Nb, obtenidos por Soldadura con Electrodo Autoprotegido Energizado (FCAW-S) con adición de alambre frio. A partir de la valoración conjunta de los datos que brindaron las herramientas analíticas tales como Fluorescencia de Rayos-X, Difracción de rayos-X (DRX) y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) con Espectrometría de Energía Dispersiva de Rayos X (EED) fue determinada la presencia de carburos complejos de tipo NbCx con estructura cubica centrada en las caras del tipo Na4Cl4. En estos carburos de niobio se observó sustituciones isomorfas de Fe y Cr por Nb en la red cristalina, en la cual se determinó una dependencia cuadrática del parámetro de la red (ao) con la cantidad de carbono en su estructura. Las características cristaloquímicas de estos carburos de niobio complejos auguran propiedades satisfactorias en los depósitos por soldadura de alta resistencia al desgaste abrasivo y alta dureza debido a la compatibilidad estructural de los carburos de niobio con la matriz austenítica. En este trabajo se abordara exclusivamente criterios sobre las características cristaloquímicas y estructurales de los carburos de niobio formados en depósitos del tipo de fundición blanca del sistema Fe-Cr-C-Nb.

***Abstract:*** *In this paper, an assessment is made of the crystallochemical characteristics of complex niobium carbides in hardfacing weld deposits of white casting alloy of the Fe-Cr-C-Nb system, obtained by welding with Energized Self-Protected Electrode (FCAW-S) with addition of cold wire. From the joint assessment of the data provided by the analytical tools such as X-ray fluorescence, X-ray diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopy (SEM) with X-ray Dispersive Energy Spectrometry (DES) was determined the presence of complex carbides of NbCx type. In these niobium carbides, isomorphic substitutions of Fe and Cr by Nb were determined in the crystalline network, in which a quadratic dependence of the network parameter (ao) was observed with the amount of carbon in its structure. The crystallochemical characteristics of these complex niobium carbides augur satisfactory properties in the wed deposits of high resistance to abrasive wear and high hardness due to the structural compatibility of the niobium carbides with the austenitic matrix*. *In this paper, we will exclusively address criteria on the crystallochemical and structural characteristics of the niobium carbides formed in deposits white casting alloy type of the Fe-Cr-C-Nb system*.

**Palabras Clave:** Depósitos de recargue, Carburos NbCx, Cristaloquímica.

***Keywords:*** *Hardfacing deposits, Carbides NbCx, Crystallochemestry.*

**1. Introducción**

Debido a la compleja naturaleza del sistema cuaternario Fe-C-Cr-Nb resulta difícil precisar, aún para tasas lentas de enfriamiento, tanto el equilibrio de las fases como la trayectoria de solidificación del sistema [1]. No obstante, se considera, de forma general, que la solubilidad de Fe y Cr en NbC es muy baja [2, 3]. Sin embargo, en el caso de los procesos derecargue por soldadura, con velocidad de enfriamiento elevada (entre 102,4 y 103 oC/s), se alcanza un incremento de la inserción de Cr y Fe en los carburos del tipo NbCx [4,5], así como deformaciones en la celda unitaria [6,7].

Desde la mitad de siglo XX se han realizado diversos estudios estructurales mediante DRX, dirigidos a determinar como la relación molar C/Nb influye sobre los parámetros de la celda unitaria (ao) en los carburos de niobio cúbicos con estructura tipo NaCl. Storms y Krikorian (1959) [8], al estudiar la variación del parámetro de la red con el contenido de carbono en carburos de niobio (NbCx) cúbico, sintetizados a altas temperaturas, desarrollaron una ecuación que expresa la dependencia entre esos dos parámetro a 25 oC: ao(Å) = 4,4704 – 0,0239(1-x) – 0,3568(1-x)2, donde x es la relación molar C/Nb. Basándose en los resultados de Storms y Krikorian (1959) [8] entre otros, Kempter (1960) [9] publicó una ecuación con la dependencia:

ao(Å) = 4,09847 + 0,71882x – 0,34570x2 (1),

pero en este caso x expresa el número de átomos de carbono (Cx) y oscila entre 0,7 y 0,996.

En 1961, Elliott [10] expone un diagrama, en el cual se revela como varían linealmente los parámetros de la celda unitaria del NbCx (cúbica tipo NaCl), en aleaciones templadas a una temperatura de 2000 oC, en función del contenido de carbono entre 8,25 y 10,25 %. Por su parte, Wyckoff (1963) [11] reporta que los carburos extremos NbC0,7 y NbC0,98 presentan valores de ao de 4,4320 y 4,4691 (20 oC), respectivamente. También, en este trabajo Wyckoff [11] refiere que la fórmula cristaloquímica del carburo de niobio de la celda cúbica centrada en las caras (CCC) es Nb4C4 (MM: 419,67 g/mol), en la cual las posiciones de sus cuatro átomos respectivos son:

Nb: 000, ½½0, ½0½, 0½½ ó 000, CCC

C: ½½½, ½00, 0½0, 00½ ó ½½½, CCC

Elliott (1965) plantea criterios referentes al comportamiento de los contenidos de carbono y niobio en la obtención de diversos carburos de niobio, relacionando sus características estructurales y destacando lo referente a los carburos de niobio del tipo cúbico [12]. Al respecto, Lyakishev (1981) aborda aspectos termodinámicos que brindan información complementaria de la interacción del niobio con el carbono en la formación de fases (Nb2C y NbC) y el comportamiento de estas fases en el diagrama del sistema binario Nb-C [13].

**2. Materiales y métodos**

De los tres depósitos de recargue duro del sistema Fe-Cr-C-Nb, obtenidos por FCAW con un alambre tubular energizado en combinación con tres diferentes alambres macizos fríos se seccionaron en varias partes para la obtención de probetas (M2, M4 y M6), las cuales fueron preparadas mediante desbaste en una rectificadora por la parte superior de los depósitos según lo reportado en [14].

A las probetas se les determinó la composición elemental mediante un espectrómetro de (RIGAKU), modelo ZSX Primus II, en el cual está instalado un tubo de rayos-X con ánodo de rodio (45Rh, λKα = 0,614796 Å) y cristal analizador LiF(200), 2d = 4,028 Å, combinación que permite analizar las líneas espectrales de la serie Kα, Kβ, Lα e Lβ entre otras de los elementos, desde el calcio (20Ca) hasta al uranio (92U). En el espectro de los elementos metálicos analizados no se observó interferencia alguna entre sus líneas de la serie Kα con las de la serie Lα de cualquier otro elemento químico de la muestra.

Las probetas para el análisis químico cuantitativo (AQ) de los elementos carbono (12C) y silicio (14Si) fueron las mismas que se utilizaron en XRF y XRD, de las cuales se extrajeron, posteriormente de la superficie pulida, virutas de 5 zonas con un taladro de columna mediante una broca idónea de 5 mm a 100 rpm, bajo la acción de un refrigerante. Las virutas se lavaron con etanol y se secaron en una desecadora al vacío a 40 oC. La determinación de 12C y 14Si se realizó por vías clásicas del análisis químico (AQ): volumétrica y gravimétrica, respectivamente.

Las características estructurales de la fases presentes en las probetas fueron determinadas a partir de los difractogramas, obtenidos en un difractómetro Shimatzu XRD-6000 (40 kV y 30 mA) con radiación monocromátizada λCuKα1 (1,5406 Å) en el intervalo angular 2θ de 20 a 140o, con una velocidad del goniómetro de 1o/min. La identificación de las fase presentes en las probetas se realizó mediante un programa HighScorePlus versión 3.0. La determinación de los índices de Miller de cada fase presente en las probetas se realizó según los procedimientos sugeridos por Cullity (2014) [7]. La determinación de los parámetros de la red de los carburos de niobio y de cromo se realizó mediante el método analítico, utilizando procedimientos estadísticos sugeridos por Quintana-Puchol (1986) [15], para la valoración sobre la precisión de los parámetros de la red de los respectivos carburos y otras fases. El valor de los parámetros de la red permite estimar con mayor detalle las características de la redes de los carburos de niobio NbCx. El valor de los parámetros de las redes de los carburos de niobio permitió valorar la relación atómica C/Nb.

Réplicas de las probetas (M2, M4 y M6) se destinaron a la microscopía, las cuales fueron preparadas y atacadas con agua regia, de acuerdo a las normas ASTM E 3-01 y ASTM E 407-99 [16, 17]. La morfología de la microestructura y la abundancia de las fases presentes en las muestras fueron analizadas por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) a diferentes aumentos, consideraciones que se tuvieron en cuenta en la selección de las zonas más representativas para obtener imágenes con un aumento de 5000X con el objetivo de determinar, mediante Espectrometría de Energía Dispersiva de Rayos-X (EDS), la composición química elemental puntual (PX) de las fases fundamentales presentes.

Las informaciones extraídas por los dos métodos analítico instrumentales (XRD y XRF) y por el químico clásico (AQ), las cuales expresan, con alto grado de veracidad, las composiciones química y fásicas globales de la probeta, resultados que se conjugaron con aquellos aportados por técnicas analíticas SEM y EDS, que brindan informaciones de carácter zonal y puntual, respectivamente. Mediante esta forma de conjugar los resultados de varias técnicas analíticas es posible especificar, con alto grado de certeza, las características químicas-estructurales y cuantificar la cantidad de las fases fundamentales presentes en las diferentes aleaciones.

**3. Resultados y análisis**

Los resultados del análisis químico cualitativo y cuantitativo elemental de la probetas rectangulares radiada por FRX y los de las virutas por AQ (\*) se exponen en la Tabla 1.

En los valores del análisis cuantitativo por espectrometría XRF, referente a las líneas espectrales Kα de los elementos analizados y conjugados con los reportados por AQ (\*), en la Tabla 1, no se denotan diferencias sustantivas que indiquen la presencia de fases esencialmente diferentes en cada una de las probetas analizadas.

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 1, el valor de la relación másica porcentual entre el contenido de todos los metales posibles formadores de carburos (Nb, Cr, Mo y Fe) y el del carbono (≈ 23/1) se advierte que el contenido de carbono solo puede cubrir potencialmente la formación de aproximadamente el 50 % de los mismos, sino que además el contenido del Fe triplica al contenido~~s~~ del resto de los metales formadores de carburos al concurrir por la opción de combinarse con el carbono, aspecto cuantitativo favorable, pero en realidad solo tiene la posibilidad de participar con **¼** de su contenido en la constitución posiblemente de otros carburos complejos debido a su relativo alto valor de la energía libre de Gibbs de formación (ΔGf) de sus carburos. El resto del contenido del Fe (**¾**) debe estar presente en las aleaciones (probetas) en una de sus formas alotrópicas con un contenido muy bajo de carbono.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Tabla 1. Análisis químico cuantitativo (m-%) por FRX y gravimétrico (\*) de los  depósitos | | | | | | | |
| Elemento | M2 | M4 | M6 | Elemento | M2 | M4 | M6 |
| 28Ni | 0 | 1,33 | 0 | 42Mo | 0,02 | 0,026 | 0 |
| 26Fe | 70,04 | 68,22 | 72,56 | 41Nb | 4,46 | 4,73 | 4,45 |
| 25Mn | 0,54 | 0,41 | 0,55 | \*Si | 0,51 | 0,5 | 0,69 |
| 24Cr | 19,96 | 20,48 | 17,62 | \*C | 4,49 | 4,33 | 4,13 |

En la Figura 1 se muestran los difractogramas de las probetas (M2, M4 y M6). Al comparar detalladamente cada uno de los difractogramas, se observa que existen pequeñas diferencias en las posiciones 2θ e intensidades de los máximos de los reflejos, así como el desarrollo de los perfiles de los reflejos, aspectos que indican la existencia de variaciones estructurales en las fases presentes.

Figura 1. Difractogramas de las probetas M2, M4 y M6

El análisis detallado de los perfiles del conjunto de reflejos designados a la fase NbCx y la valoración de la serie numérica, que constituye la relación sen2(θi)/sen2(θ1), conducen a la determinación de los índices de Miller para las redes cúbicas centradas en las caras (CCC) de γFe y NbCx.

Los resultados de los cálculos de los parámetros de la red cristalina de los carburos de niobio y de la austenita, obtenidos de las tres probetas, se resumen en la Tabla 2, donde se observa una variación distinguible y aparentemente irregular de los valores de los mismos. Es muy probable que las variaciones de los parámetros de la red cristalina de los carburos de niobio (NbCx) estén asociados a la cantidad de átomos de carbono (Cx) por celda unitaria.

Tabla 2. Características roentgenoestructurales de las fases de interés de las probetas

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Probeta M2 | | Probeta M4 | Probeta M6 |
| Fases | ao, Å | ao, Å | ao, Å |
| NbCx | 4,4614 | 4,4405 | 4,4607 |
| γFe | 3,5899 | 3,5899 | 3,5927 |

A partir de uso de la ecuación (1) que relaciona la dependencia de la cantidad de átomos Cx en el NbCx y el valor del parámetro de la red CCC (ao) reportados en la Tabla 3 se calcula los contenidos de los átomos de carbono promedio Cx que les corresponde a los carburos de niobio que exhiben las tres probetas. Los resultados de ambas operaciones se reportan en la Tabla 3

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Tabla 3. Contenido global de carbono en NbCx de en cada probeta | | | |
| Probetas | NbCx | | |
| ao | Cx | %-m(NbCx) |
| M2 | 4,4614 | 0,845 | 4,48 |
| M4 | 4,4405 | 0,730 | 4,97 |
| M6 | 4,4607 | 0,838 | 4,67 |

En la Figura 2 se exponen la micrografías SEM de las probetas tratadas según [14].

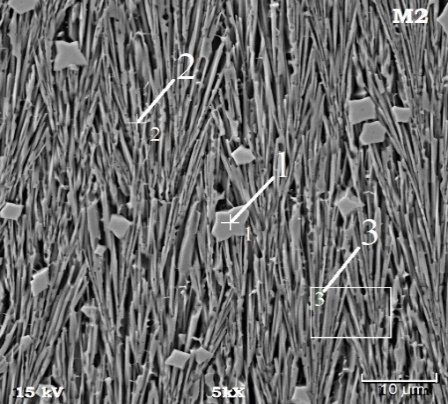
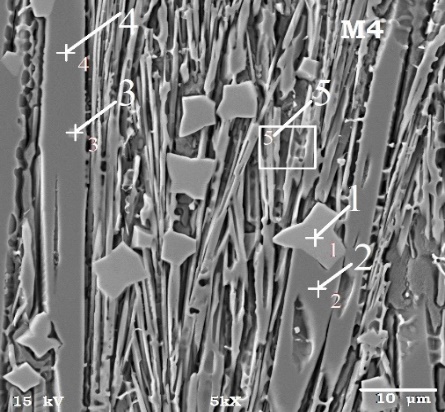
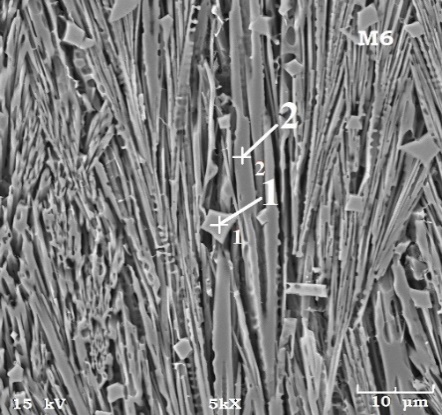


Figura 2. Micrografías SEM realizadas a 5 kX en diferentes zonas representativas de las probetas M2, M4 y M6, donde se señalan los puntos (PX, X= 1 y 3) donde se realizó el análisis elemental cuantitativo EDS.

En la Tabla 4 se reportan los resultados de la composición química elemental puntual (PX) obtenidos por Espectrometría de Energía Dispersiva de Rayos-X (EDS) en diversas zonas de las probetas: M2, M4 y M6. La selección de diferentes puntos en la micrografía SEM pretende reflejar las características morfológicas de las fases más representativas, que se manifestaron en los diagramas de DRX (Figura 1 y Tabla 2).

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Tabla 4. Composición química obtenida por espectrometría de energía dispersiva (EDS) en diferentes puntos (PX, X= 1, 2, …, 5) representativos de las probetas M2, M4 y M6 | | | | |
| Zonas | Probeta M2 | Probeta M4 | | Probeta M6 |
| P1 | P1 | P3 | P1 |
| Elemt. | m-% | m-% | m-% | m-% |
| C | 10,40 | 8,92 | 8,49 | 10,66 |
| Cr | 2,64 | 1,18 | 1,36 | 1,56 |
| Fe | 0,99 | 0,88 | 1,22 | 1,25 |
| Nb | 85,97 | 89,02 | 88,93 | 86,53 |

Los resultados expuestos de la Tabla 4 inducen a pensar que los carburos presentes en los depósitos son ternarios. Para los carburos de niobio deben presentarse por la fórmula cristaloquímica (Nb1-y-zCry,Fez)Cx.

Mediante criterios estequiométricos, quimiométricos y de balance de masa se determinaron, a partir de los datos de las Tablas 1, 3 y 4, las fórmulas cristaloquímicas de los diferentes cristales de carburos presentes puntualmente (fases) en cada aleación.

En los depósitos donde predominan los carburos complejos ternarios de niobio más del 99 % de niobio de la aleación conforman estos carburos.

Para discernir el valor del parámetro de red (ao) correspondiente a cada tipo de los carburos complejo de niobio (Nb1-y-zCry,Fez)Cx en cada punto de las probetas (M2, M4, M6) se parte del contenido de carbón (Tablas 3 y 4) , como guía indicativa, la relación que existe entre el valor de sus parámetros de la red cristalina (ao) y contenidos atómico del carbono en los carburos de niobio. Como antecedente se tiene el trabajo de Stroms and Krikorian (1960), el cual consistió en determinar y tabular los valores del parámetro (ao) respecto a la variación del número (x) de los átomos de carbono (Cx) de ocho carburos de niobio (NbCx)[8]. En el presente trabajo, a partir de los datos tabulados y reportados por Stroms and Krikorian (1960) se desarrolla la ecuación de regresión siguiente:

Cx = 91,239ao2 - 806,66ao+ 1783,6 y R² = 0,9989 (2),

cuyo comportamiento se reporta en forma de gráfico (Figura 3).

Debido a que sus valores de ao presentan una alta correlación con el contenido estructural del carbono (x) tal como lo indica la Figura 3 (R2 = 0,9989), se calculó mediante las ecuaciones de correlación de segundo orden el parámetro de la red (ao) para cada tipo de carburo reportados en la Tabla 5.

Figura 3. Dependencia del número de átomos de C en NbCx en función del parámetro ao a partir de los valores tabulados de Stroms and Krikorian (1960).

En el caso de los carburos complejos de niobio [(Nb1-y-zCryFez)Cx], las oscilaciones más determinantes desde el punto de vista estructural se presentan en el contenido de los átomos de carbono, cuyos valores oscilan entre 0,70 y 0,90, aspecto que junto con la inserción de átomos de Fe y Cr en la celda unitaria del carburo de niobio incide apreciablemente en el parámetro de la red y en sus masas moleculares (Tabla 5).

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Tabla 5. Fórmulas cristaloquímicas y características de los parámetros de la red  de las fases más representativas por zonas de las probetas M2, M4 y M6 | | | | | | |
| Probeta M2 | | | | | | |
| Zonas | Fórmula de las fases | MM, g/mol | ao, Å | bo, Å | Vc, Å3 | ρ, g/cm3 |
| P1 | (Nb0,93Cr0,05Fe0,02)C0,87 | 100,62 | 4,4650 | - | 89,01 | 7,507 |
| Probeta M4 | | | | | | |
| Zonas | Fórmula de las fases | MM, g/mol | ao, Å | bo, Å | Vc, Å3 | ρ, g/cm3 |
| P1 | (Nb0,96Cr0,02Fe0,02)C0,74 | 100,338 | 4,4418 | - | 87,63 | 7,604 |
| P3 | (Nb0,95Cr0,03Fe0,02)C0,70 | 99,493 | 4,4310 | - | 87,00 | 7,595 |
| Probeta M6 | | | | | | |
| Zonas | Fórmula de las fases | MM, g/mol | ao, Å | bo, Å | Vc, Å3 | ρ, g/cm3 |
| P1 | (Nb0,95Cr0,03Fe0,02)C0,90 | 101,66 | 4,4678 | - | 89,18 | 7,571 |

A partir de los resultados de la composición química por FRX y AQ de las probetas (Tabla 1) y de los contenidos por EDS de carbono relacionado a los carburos complejos de niobio (Tabla 4) fueron calculados por estequiometria y quimiometría los posibles contenidos de átomos de carbono considerando a aquellos brindado por las características estructurales usando las técnicas DRX (Figuras 3), asociados a los parámetros de la red (ao) de los NbCx Tabla 5. Al conjugar los resultados de la Tabla 4 con los de la Tabla 5 se obtiene dos funciones de segundo orden que se expone en la Figura 4, que son útiles para cuantificar las fases presentes en las probetas (Tabla 7).

Figura 4. Correlación entre los números de átomos de carbono (Cx) y el parámetro de la red de los NbCx presentes como representantes globales de cada una de las probetas y en los sus cristales en cada una de ellas.

En la Tabla 6 se muestra la composición cuantitativa de las fases fundamentales presentes en las probetas analizadas. En las tres aleaciones el contenido másico porcentual del carburo de cromo-hierro oscila en un amplio intervalo entre 36 y 42 %, mientras que el contenido del carburo de niobio se enmarca entre 4 y 5 %. La austenita constituye de la composición másica entre 52 y 58 %, la cual contiene entre 0,06 y 0,1 % de carbono.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Tabla 6. Composición porcentual de las fases de interés en las probeta M2, M4 y M6 | | | | | | | | | |
| Fases | M2 | | | M4 | | | M6 | | |
| m-% | ρ, g/cm3 | V-% | m-% | ρ, g/cm3 | V-% | m-% | ρ, g/cm3 | V-% |
| (Nb1-y-zCryFez) Cx | 4,56 | 7,51 | 4,47 | 4,81 | 7,6 | 4,72 | 4,55 | 7,57 | 4,48 |
| γFe | 54,14 | 7,64 | 52,16 | 54,98 | 7,67 | 53,46 | 58,35 | 7,68 | 56,64 |
| (Mn,Mo,Si)\* | 1,07 | 5,05 | 1,56 | 0,94 | 4,78 | 1,47 | 1,25 | 4,61 | 2,02 |
| \*Elementos químicos ocluido dentro de la matriz fundamentalmente.\*\* valor teórico posible | | | | | | | | | |

**4. Conclusiones**

La conjugación de la caracterización volumétrica de las aleaciones, con técnicas de análisis puntual de fases, permitió realizar la interpretación analítica estructuroquímica de las fases presentes. Ello permitió establecer la existencia de dos fases cubicas centradas en las caras: (NbCX) γFe.

Las variaciones de composición químicas puntual de los carburos NbCx y (Cr1-XMx)7C3 se corresponden con una regularidad de comportamiento en las fórmulas cristaloquímicas y el del parámetro de la red de ambas fases. Se evidencia un comportamiento con una dependencia cuadrática entre el número de átomos de carbono (nc) y el parámetro de la red (ao(NbCx)) (n(NbCx) = 91,239(ao,c)2 - 806,66ao,c + 1783,6) para los carburos cúbicos complejos de niobio (Nb1-y-zCryFez)Cx.

En las aleaciones estudiadas, el contenido másico porcentual el del carburo de niobio se enmarca entre 4 y 5 % y la austenita constituye entre 42 y 55 %.

**Agradecimientos**

Los autores agradecen al convenio CAPES/MES que propició el intercambio entre profesores de LAPROSOLDA y FEMEC (Universidad Federal de Uberlándia) y el CIS (Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas) para la realización de este trabajo conjunto.

**6. Bibliografía**

1. Gregolin, J.A.R. and Alcantara. N.G. 1991:Solidification and Phase Equilibria in the Fe-C-Cr-NbC System. Metallurgical Transactions. Vol. 22A, (October), pp. 2181-2185
2. Kesri, R.; Durand-Charre, M. 1987: Phase equilibria, solidification and solid-state transformations of white cast irons containing niobium. Journal of Materials Science. Vol. 22, pp.2959–2964.
3. Baik, H.K.; and Loper, C.R., Jr. 1988: The influence of niobium on the solidification structure of Fe–C–Cr alloys. AFS Trans., 96 (80), pp. 405–412.
4. Pokhodnya, I.K. et al. 1990: Metallurgy of arc welding. Vol. 1: Arc processes and electrode welding, editorial Riecansky Science Publishing. Cambridge, UK, 243 pp.
5. Probst. H. 2002: Kompendium der Scweiβtechnik, Band 2: Sceweiβmetallurgie. Verlag GmbH, Dusseldorf, 302 pp.
6. Taylor, A. 1961: X-Ray Metallography, Editorial John Wiley and Sons. Inc. NY, 992 pp.
7. Cullity, B.D. and Stock, S.R. 2014: Elements of X-Ray Diffraction, 3rd Edition, Pearson, New International Edition, printed in the United States of America. 654 pp.
8. Storms, E.K and Krikorian, N.H. 1959: The Variation of Lattice Parameter with Carbon Content of Niobium Carbide. J. Phys. Chem., **63**, pp. 1747-1749
9. C.P. Kempter, E.K.; Storms and Fries, R.J. 1960: Latice Dimensions of NbC as Function of Stoichiometry. J. Chem. Phys., 33, pp.1873-1874.
10. R.P. Elliott (1961), Trans. Amer. Soc. Met. 53,13, in Pearson, W.B. A Handbook of the lattice spacings and structures of metal and alloys, Vol. 2, Editorial Pergamon Press, first Edition (1967), pp. 1334-1335
11. R.W.G. Wyckoff, Chrystal Structure, Vol. 1, 1963: Interscience Publishers, John Wiley and Sons, N.Y. p.88
12. Elliott, R. P. 1965: *Constitution of Binary Alloys,* First Supplement, McGraw-Hill Book Company. Inc., New York. 365 pp.
13. N.P. Lyakishev, N.P.; Tulin, N.A. y Pliner, Yu. L. 1981. Alecciones y aceros aleados con niobio. Moscú, Editorial Metalurgia. pp.12-16 (en ruso)
14. Amado Cruz-Crespo, Rafael Fernández-Fuentes, Antonio Valtair Ferraressi, Rafael Ariza Gonçalves, Américo Scotti. 2016 Microstructure and Abrasion Resistance of Fe-Cr-C and Fe-Cr-C-Nb Hardfacing Alloys Deposited by S-FCAW and Cold Solid Wires, Soldagem & Inspeção. 21(3), pp. 342-353,
15. Quintana-Puchol, R., Manuel García-Ramos, Omar Hernández-González, 1986. Principios de Difracción de Rayos-X, Análisis Térmico y Espectroscopia Mössbauer, Editorial EMPES-MES, La Habana. 370 pp.
16. ASTM E 3 – 01 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. pp 1-12.
17. E 407 – 99 Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. pp 1-21.