

Tesista: Nicolás Tenaglia

Título al que aspira: Doctor en Ciencia de Materiales, UNMdP

Tema: "Aceros colados bainíticos libres de carburos: estudio de la estructura de solidificación, cinética de transformación y propiedades mecánicas "

Director: Dr. Juan Massone

Codirector: Dr. Alejandro Basso

Jurados:

Dr. Carlos Cicutti (Centro de Investigaciones Industriales de Tenaris R&D)

Ing. Lucio Iurman (UTN-Reg. Bahía Blanca)

Dr. Ricardo Dommarco (CDS, CONICET – UNMdP)

Resumen

El acero es el material estructural más importante utilizado en la industria debido a su bajo costo relativo y al amplio rango de propiedades mecánicas que se obtienen gracias a sus variantes microestructurales, que pueden alcanzarse controlando la composición química y los parámetros de procesamiento. Entre los aceros de alta resistencia de mayor relevancia se destacan los que poseen microestructura bainítica. La bainita es un agregado de fases descubierto por Davenport y Bain durante experimentos con transformaciones isotérmicas de aceros, en 1930. Transcurrido el tiempo, la bainita ha sido extensamente estudiada, dando lugar a desarrollos en teorías de transformaciones de fase y a una excelente combinación de propiedades mecánicas que pueden lograrse con este tipo de microestructuras, especialmente alta resistencia y tenacidad. Sumado a esto, el bajo costo de procesamiento de la bainita ha llevado a aumentar su uso en diferentes aplicaciones industriales.

Una nueva variante de aceros bainíticos con altos contenidos de silicio, de reciente desarrollo, posee una microestructura con una cantidad elevada de austenita retenida y se caracterizan por estar libres de carburos, dando origen de esta manera a los denominados “aceros bainíticos libres de carburos”. Sobre estos aceros en los últimos años se han realizado numerosos estudios con la finalidad de optimizar su composición química y procesamiento, y de caracterizar sus propiedades mecánicas y correlacionarlas con su microestructura. Esta nueva generación de aceros con estructuras libres de carburos ha mostrado una excelente relación de propiedades mecánicas-costos de producción, con la posibilidad de obtener microestructuras de elevada resistencia, dureza y tenacidad, que abren excelentes perspectivas de utilización en diversas aplicaciones.

Los trabajos reportados en la literatura particularmente sobre aceros bainíticos libres de carburos están centrados en la determinación de sus propiedades mecánicas y al desgaste en función de la composición química y variables del tratamiento térmico. Sin embargo, es importante remarcar que estos estudios, casi en su totalidad, están realizados sobre aceros

que, previamente al tratamiento de austemperizado, han sufrido un tratamiento termomecánico de homogeneización y laminación o forjado, lo que genera una matriz metálica prácticamente libre de defectos como porosidad y rechupes, y con muy bajos niveles de segregación de elementos químicos. Sin embargo, muchas piezas de acero relacionadas con la industria automotriz, minera o petrolera se pueden obtener a través de la técnica de fusión y colado (cigüeñales, arboles de leva, cuerpos de bomba, partes de suspensión, etc.) y dichas piezas poseen geometrías y espesores variables. Es ampliamente reconocido que las propiedades mecánicas de piezas fundidas difieren de aquellas obtenidas por laminación o forja.

El trabajo de tesis estuvo centrado en la obtención y caracterización de microestructuras bainíticas libres de carburos obtenidas a partir de aceros colados de alto silicio. El estudio incluyó el diseño de 7 aceros aptos para ser tratados térmicamente y obtener bainita libre de carburos. Para diseñar la composición química de los mismos, se han utilizado valores y tendencias encontradas en bibliografía. Luego se ha realizado una caracterización de la estructura de solidificación de los aceros en su estado bruto de colada y se ha cuantificado la microsegregación de elementos de aleación. La presencia de un patrón de microsegregación, con zonas más y menos aleadas, es la principal característica de los aceros colados y que diferencia a éstos de aquellos obtenidos mediante laminado o forja.

Luego se determinó la austemperabilidad de los aceros estudiados en este trabajo. Este concepto está relacionado con el máximo tamaño de pieza que puede ser tratada térmicamente y obtener una microestructura completamente bainítica, evitando la formación de fases indeseadas como la ferrita y perlita. Para esto, se desarrolló y validó un procedimiento, mediante simulaciones numéricas, que permite obtener el máximo diámetro austemperable a partir de la realización de un ensayo estándar de templabilidad. Los resultados indican que los aceros diseñados permiten obtener piezas completamente bainíticas en un amplio rango de tamaños, desde unos pocos hasta varias decenas de milímetros de diámetro.

Posteriormente, se estudió la transformación bainítica para cada uno de los aceros a distintas temperaturas de transformación. Estas últimas fueron seleccionadas a partir de la composición química de los aceros y buscando obtener distintas propiedades mecánicas. En este sentido, se lograron obtener las microestructuras deseadas en tiempos acordes a los procesos industriales y se verificó que la microsegregación influye en la cinética reacción, siendo ésta más rápida en las zonas menos aleadas. Además, también se realizó una caracterización de las microestructuras obtenidas y se observó que las mismas no son homogéneas debido a la heterogeneidad química presente en los aceros colados.

Por último, se realizó una caracterización mecánica de las microestructuras obtenidas. Los ensayos de tracción arrojaron que la tensión de rotura de los aceros es dependiente de la temperatura de transformación isotérmica y que un aumento de la tensión máxima involucra, para un acero en particular, una disminución de su ductilidad. Además, cabe mencionar que se obtuvieron combinaciones de resistencia-ductilidad muy buenas, que cumplen con algunos grados de la norma ASTM, que regula los aceros colados, y se ha superado la performance de la mayoría de los aceros colados con microestructura bainítica libre de carburos reportados en bibliografía. También se superó la performance de muchos aceros avanzados de alta resistencia.

Abstract

Steel is the most important structural material used in the industry due to its low relative cost and the wide range of mechanical properties resulting from its microstructural variants, which can be achieved by controlling the chemical composition and processing parameters. Among the most important high strength steels are those with bainitic microstructure. Bainite is an aggregate of phases discovered by Davenport and Bain during the examination of the isothermal transformations of steels, in 1930. Since then, bainite has been extensively studied, leading to a better understanding of the phase transformations involved and to the development of materials and processes which lead to steels of excellent mechanical properties, in particular combining high tensile strength and toughness. In addition, the low processing cost of bainite has led to a sustained increase of its use in different industrial applications.

A new variant of bainitic steels with high silicon content has a microstructure that includes high amounts of retained austenite and is free of carbides, thus giving rise to the so-called "carbide-free bainitic steels". Several studies have been carried out on these steels during recent years in order to optimize their chemical composition and processing, and to characterize their mechanical properties and correlate them with their microstructure. This new generation of steels with carbide-free structures has shown an excellent ratio of mechanical properties-production costs, with the possibility of obtaining microstructures of high strength, hardness and toughness, which open excellent perspectives of use in various applications.

The works reported in the literature particularly on carbide-free bainitic steels are focused on the determination of their mechanical properties and wear resistance as a result of their chemical composition and thermal treatment variables. However, it is important to note that these studies, almost entirely, are made on steels that, prior to the austempering heat treatment, have undergone a thermomechanical treatment of homogenization and rolling or forging, which generate a metallic matrix practically free of defects such as porosity and shrinkage, and with very low levels of segregation of chemical elements. However, many steel parts applicable to the automotive, mining or oil industries can be obtained through the casting technique (crankshafts, camshafts, pump bodies, suspension parts, etc.) and these parts have variable geometries and thicknesses. It is widely recognized that the mechanical properties of castings differ from those obtained by rolling or forging.

This thesis work was focused on the development and characterization of carbide-free bainitic microstructures obtained from high silicon cast steels. The study includes the design of 7 steels suitable to be heat-treated to obtain bainite free of carbides. Results and trends reported in literature have been used to design the chemical compositions. Then, a characterization of the solidification structure of the steels in their as cast state was carried out and the microsegregation of alloying elements was quantified. The presence of a microsegregation pattern, with high and low alloyed zones, is the main characteristic of cast steels and differentiates them from those obtained by rolling or forging.

Then the austemperability of the steels was determined. Austemperability characterizes the maximum piece size that can be heat-treated to obtain a completely bainitic microstructure,

avoiding the formation of unwanted phases such as ferrite and perlite. For this, a procedure was developed and validated, using numerical simulations, which allows to obtain the maximum austemperable diameter from the results of a standard hardenability test. The results indicate that the designed steels allow to obtain completely bainitic pieces in a wide range of sizes, from a few to several tens of millimeters in diameter.

Subsequently, the bainitic transformation for each steel at different transformation temperatures was studied. Austempering temperatures were chosen for the different steels seeking to obtain a range of mechanical properties. In this sense, it was possible to obtain the desired microstructures using relatively short austempering times, compatible with industrial processes. It was verified that microsegregation influences the kinetic reaction, being this faster in low-alloyed areas. In addition, a characterization of the obtained microstructures was also performed, showing that microstructural heterogeneities arise from the chemical inhomogeneity present in the cast steels.

Finally, a mechanical characterization of the obtained microstructures was carried out. Tensile tests showed that the tensile stress of steels is dependent on the isothermal transformation temperature and that an increase in maximum stress involves, for a particular steel, a decrease in its ductility. Very good strength-ductility combinations were obtained, which comply with the requirements of the ASTM standard which regulates cast steels. In addition, the performance of most cast steels with carbide-free bainitic microstructure reported in the literature has been exceeded. Furthermore, the performance of many advanced high strength steels was also exceeded.