

Tesista: Diego Iván Pedro

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

Tema: "Tribología de Fundición Nodular Austemperada con Carburos: Fatiga de Contacto y Deslizamiento"

Director de tesis: Dr. Ricardo Dommarco

Lugar de trabajo: Facultad de Ingeniería, UNMdP

Fecha de defensa: 6 de marzo de 2020

Jurados:

Dr. Walter Tuckart (IFISUR, UNS-CONICET)

Dr. Julio César Klein Das Neves (Universidad Tecnológica Federal de Paraná, Brasil)

Dr. Juan Massone (CDS, INTEMA, UNMdP-CONICET)

Resumen:

La fundición nodular austemperada, en inglés Austempered Ductile Iron o ADI, es un material ferroso fabricado por colada. Su microestructura consiste en partículas de grafito libre en forma nódulos, inmersos en una matriz compuesta por una mezcla fina de ferrita y austenita, obtenida mediante tratamiento térmico. Este material ha demostrado tener excelente resistencia al desgaste bajo diferentes mecanismos como fatiga de contacto por rodadura (FCR), deslizamiento y abrasión. No obstante, con el objetivo de mejorar su resistencia al desgaste por abrasión, se desarrolló la fundición nodular austemperada con carburos, en inglés Carbodic ADI o CADI, mediante la incorporación de carburos a su microestructura. Esto se logra por distintos caminos, como: el diseño de molde, el control de composición química, la introducción directa de carburos en el molde o sus combinaciones. El carburo posee muy alta dureza, y actúa como un refuerzo de la matriz, incrementando su resistencia a la abrasión, aunque reduce la ductilidad y la tenacidad al impacto. Sin embargo, es posible encontrar un balance entre estos efectos, permitiendo al material alcanzar propiedades competitivas con otros materiales resistentes a la abrasión, por ejemplo, la fundición de hierro blanca u otros "Abrasion Resistant Irons". Hasta el presente, los estudios tribológicos sobre CADI se han enfocado en el desarrollo de su capacidad para resistir la abrasión a través del control de la microestructura, principalmente tamaño, cantidad y dispersión de carburos, tanto en condiciones de servicio de baja presión como de alta presión.

No obstante, dadas las características microestructurales del CADI, es posible plantear como

hipótesis que este material tenga también muy buena respuesta frente a otros mecanismos de desgaste, como la fatiga de contacto por rodadura (FCR) o el desgaste por deslizamiento, haciendo que se amplíen las aplicaciones potenciales a diferentes áreas industriales. En este sentido surge la necesidad de estudiar la resistencia al desgaste de CADI, tanto a la FCR como frente al deslizamiento, y su relación con las características de su microestructura.

Por lo tanto, en este trabajo de tesis, los estudios de FCR fueron realizados utilizando material en el que la precipitación de carburos fue controlada combinando dos metodologías. Una de ellas con dos geometrías de molde de distinta forma y espesor, para obtener dos velocidades de solidificación, y la otra, mediante el diseño criterioso de la composición química. Los resultados mostraron que la variación de la microestructura de la matriz, controlada a través del tratamiento térmico, tiene una influencia secundaria en la respuesta del material frente a la FCR. Por otro lado, en general la dureza es una propiedad muy importante para la FCR, en el CADI su aumento no siempre resultó en una mejora en la vida hasta la falla, indicando que otras propiedades o características de la microestructura también pueden ser determinantes.

Se observó que el desempeño del CADI sometido a FCR es superior al del ADI, y que, gracias a la presencia de carburos, posee más opciones para el control de su microestructura, como el tamaño, la cantidad y la distribución de las partículas de carburo y de grafito, pudiendo optimizar la respuesta del material para cada aplicación particular.

Para el estudio y desarrollo del CADI frente al desgaste por deslizamiento, el material se fabricó colando en un molde con una coquilla en un extremo, obteniendo así un abanico de velocidades de solidificación y, por lo tanto, con cantidades variables de grafito y de carburo en función de la distancia a la coquilla. Luego el material recibió el tratamiento térmico a dos temperaturas de austemperado. Así, se evaluó la influencia de una variedad importante de microestructuras, sobre la fricción y el desgaste por deslizamiento. También se estudiaron las huellas de desgaste, analizando el micro-mecanismo de desgaste o daño presente y su relación con la microestructura en las distintas variantes de material.

Por otro lado, se estudió la influencia de la velocidad de solidificación sobre la eficiencia del tratamiento térmico. Una elevada extracción de calor no sólo incrementa la velocidad de solidificación y la cantidad de carburos, sino que también condiciona la efectividad del tratamiento térmico posterior de la matriz. Sin embargo, se observó que el CADI de peor desempeño superó por casi diez veces la resistencia al desgaste del ADI de mejor desempeño, incluso cuando sus niveles de dureza resultaron comparables. A su vez, a través del estudio de la influencia de las diferentes características microestructurales, se demostró que es posible optimizar la resistencia al desgaste por deslizamiento, permitiendo diseñar la estructura de CADI para cada aplicación.

Los estudios realizados demuestran que es posible obtener una gran variedad de microestructuras a través del diseño de molde, el control de la composición química y el tratamiento térmico, permitiendo optimizar al material según cada aplicación. De esta manera se observa que efectivamente el CADI, no sólo mejora el desempeño tribológico respecto del ADI cuando es

sometido a la abrasión, para la cual fue concebido, sino también cuando el daño o desgaste se produce por mecanismos como la FCR o el deslizamiento (adhesión, fatiga), ampliando de este modo las aplicaciones potenciales del CADI a diferentes piezas, mecanismos o incluso áreas industriales.

Abstract:

Austempered Ductile Iron (ADI) is a ferrous alloy, usually processed by casting, with a microstructure consisting of free graphite nodules immersed in a metallic matrix composed of a thin mixture of ferrite and austenite obtained by heat treatment. ADI has an excellent wear resistance under different wear mechanisms such as rolling contact fatigue (RCF), abrasion and sliding. Even so, Carbide Austempered Ductile Iron (CADI) was developed as an ADI variation in order to improve its abrasive wear resistance, by the addition of carbides into the microstructure. The carbides can be added through different procedures like mold design, chemical composition selection, direct insertion into the mold or combinations of these. Carbides have very high hardness and work as a matrix reinforcement, enhancing the abrasion resistance very effectively but at the expense of a reduction in ductility and impact toughness. Nevertheless, it is possible to balance these effects to reach an optimal combination of properties that competes with those of other abrasion resistant materials, such as white cast irons or other abrasion resistant irons.

Up to the present, tribological research about CADI was focused in the development of its abrasion resistance by controlling its microstructure, mainly through the selection of the size, amount and dispersion of carbides, for applications in both, low and high pressure abrasion. However, given the CADI microstructural characteristics, it is possible to hypothesize that this material will be able to perform well in other tribosystems, like those implying rolling contact fatigue and/or sliding (adhesive) wear. Being this the case, it would imply for CADI new possible applications not considered before. Thus, new research must be carried out on the ability of CADI to withstand RCF and sliding wear and its relation to the microstructural characteristics and damage process.

Therefore, in this thesis work, for the RCF studies, carbide precipitation was induced by a combination of two methodologies, chemical composition control (%Cr) and two mold geometries and sizes resulting in different cooling speeds. The RCF life was not significantly influenced by the heat treatment when compared with other processing parameters. Moreover, even though high hardness is usually related with good RCF performance, in this case, its increment did not always improve the RCF life, reflecting that other microstructural characteristics may also be important in CADI's performance.

It was observed that CADI's RCF life was superior to that of ADI's, and also, has more design options as consequence to the presence of carbides, being particularly important when considering different applications, since not only the matrix microstructure must be designed, but

also, carbide and graphite sizes, amount and distribution must be considered. For the sliding wear studies, a mold with a chill was used to induce a gradient of cooling speeds through the casting. In this sense, the cast samples had different amounts of graphite and carbide as function to the distance to the chill. Then, the material was heat treated with two different austempering temperatures. Therefore, the influence of a wide variety of microstructures on the damage micromechanism, friction and sliding wear was studied for the different sample castings.

The influence of the solidification speed on the efficiency of the heat treatment was also studied. High heat extraction not only results in high solidification speeds and high carbide content, but also affects the matrix heat treatment effectiveness. However, even the worst performing CADI had ten times better wear resistance than ADI, even when their hardnesses were similar. At the same time, it was shown that it is possible to optimize CADI's performance by controlling the microstructural variables affecting the sliding wear resistance, conceding flexibility to the design process for each application.

The present work demonstrates that it is possible to obtain a wide variety of CADI's microstructures through chemical composition control combined with mold and heat treatment design, allowing the material to be optimized for each application. In this way, CADI not only improves the tribological properties with respect to ADI under abrasive wear conditions, for which it was originally conceived, but also has better performance under different damage or wear mechanisms such as RCF or sliding (adhesion, fatigue). Therefore, CADI has now new potential applications in different parts, mechanisms or even industrial areas.