



Universidad Nacional
Autónoma de México



FACULTAD DE QUÍMICA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA

PROYECTO

TÍTULO:

“COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DE UN ACERO EXPERIMENTAL AVANZADO DE ALTA RESISTENCIA MICROALEADO CON BORO TRATADO TÉRMICAMENTE”

DR. ANTONIO ENRIQUE SALAS REYES.

Profesor de Carrera de Tiempo Completo Asociado “C”.

Departamento de Ingeniería Metalúrgica, FQ-UNAM.

TUTOR RESPONSABLE.

DR. MIGUEL ÁNGEL HERNÁNDEZ GALLEGOS.

Profesor e Investigador de Tiempo Completo – Titular B. SNI - I

Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados, FI-UNAM.

SUPERVISOR TÉCNICO.

1. Antecedentes.

La industria automotriz está orientada hoy en día en el desarrollo de vehículos con altos niveles de seguridad respecto de la integridad física de los usuarios, con menores consumos de combustible y reducir los niveles de CO₂ y con métodos de producción rentables. Esto se está logrando alcanzar mediante un diseño más inteligente y por medio de la introducción constante de nuevos materiales, más resistentes, más dúctiles y ligeros. Dichos materiales deben de ser fácilmente formables, soldables, reparables y resistentes a la corrosión. En consecuencia, una de las formas de lograrlo es empleando los aceros avanzados de alta resistencia, AHSS (Advanced High Strength Steels, por sus siglas en inglés) [1]. Los aceros avanzados se utilizan en partes vitales de un vehículo, que generalmente comprenden la configuración estructural de éstos. De hecho, muchos de los nuevos modelos de automóviles están siendo elaborados de entre un 40 y 50% de acero AHSS [2]. De esta manera, dentro de la clasificación de estos aceros se encuentran el acero de fase compleja, CP (Complex Phase, por sus siglas en inglés), los cuales han mostrado ser adecuados para la producción en serie y se recomienda su aplicación en partes de automóvil innovadoras y de diseño ligero como son los rigidizadores, armazones, refuerzos de puerta, placas de asientos y componentes del chasis [3]. El correcto acondicionamiento microestructural de carácter fino compuesto de microconstituyentes con alta resistencia conlleva a un alto límite elástico y una alta resistencia al agrietamiento, logrando obtener excelentes propiedades de plegado. De esta manera, los aceros de fase compleja están constituidos por microestructuras tanto de ferrita, bainita, martensita como de martensita revenida [4,5]. Es debido a que su inherente complejidad microestructural, donde es muy difícil distinguir entre la matriz y segundas fases, que son llamados aceros de fase compleja (ver **figura 1**) [6]. Como resultado del balance de estas características, los aceros AHSS de fase compleja están predestinados para uso en componentes de alto rendimiento en caso de colisión y representan un gran potencial para el diseño ligero, al mostrar resistencias de hasta 1100 MPa.

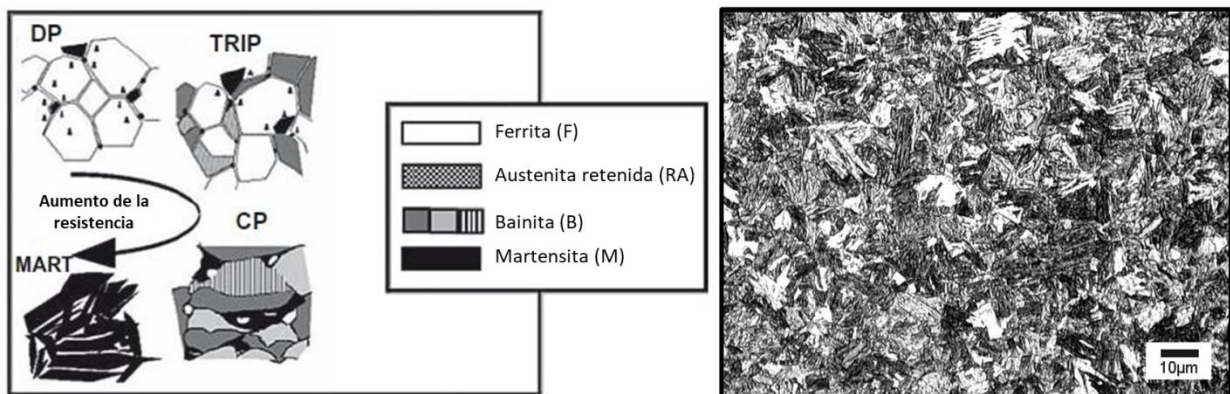


Figura 1. Ilustración típica de la microestructura de un acero AHSS de fase compleja comparado con otros grados de aceros AHSS [6].

Por otro lado, el boro es uno de los elementos microaleantes recientemente usados para la obtención de aceros AHSS, siendo significativa su adición sobre el campo de la austenita, provocando un aumento de las temperaturas Ac_1 y Ac_3 , mejora la templabilidad, mejora la resistencia y la tenacidad sobre todo a altas temperaturas y tiene una gran influencia en la cinética de descomposición de la austenita a ferrita, resultando en la formación de microestructuras bainítico-martensíticas [7]. Por un lado, se ha observado que los aceros al boro tienen un efecto benéfico en procesos de estampado en caliente, manteniendo propiedades rígidas [8], al lograr asegurar su conformabilidad. Por otro lado, el hecho de alcanzar buenos valores tanto de resistencia como de alargamiento en estos aceros AHSS, solo se pueden alcanzar a través del correcto diseño químico de la aleación, visualizándose un sustancial efecto positivo de los tratamientos térmicos sobre el comportamiento mecánico [9], al obtenerse microestructuras compuestas por multi-microconstituyentes.

Por lo tanto, de acuerdo a las solicitaciones de trabajo a las que se someta al acero de fase compleja, se hace necesario evaluar el grado de desgaste que puede sufrir éste, ya que en general, los materiales con que están fabricados los automóviles se ven afectados por el desgaste debido a la fricción presente entre ellos. Es decir, la susceptibilidad al deterioro por desgaste abrasivo, aparte de requerir mantenimiento demanda asegurar la integridad de los componentes. Cabe resaltar que la tribología estudia la interacción entre superficies en movimiento relativo y los problemas relacionados con ellos, como la fricción, el desgaste y la lubricación [10], siendo el desgaste la causa de mayor pérdida del rendimiento mecánico de los materiales. En consecuencia, uno de los objetivos de la tribología es el de minimizar los dos principales inconvenientes del contacto sólido-sólido: la fricción y el desgaste.

Los tipos de desgaste por adhesión y por abrasión son los generados por un contacto plástico [11]. En el caso de un contacto plástico entre materiales similares, la interfaz del contacto tiene fuerzas de adhesión por la formación de puentes entre átomos. Cuando la pérdida de material es el resultado de una fuerte adhesión a la interfaz del contacto, el desgaste resultante se llama desgaste por adhesión. En el caso de un contacto plástico entre un material duro y uno más blando, el material más duro penetra en el material más blando. Si la pérdida de material ocurre por una micro-cortadura (micro-cutting) del material, el desgaste resultante es conocido como desgaste por abrasión. En el caso de un contacto repetitivo, la pérdida de material se genera después de varios ciclos. En este caso, la pérdida de material de la superficie se debe al desgaste por fatiga. La pérdida de material en los desgastes adhesivos, abrasivos y por fatiga (“desgastes mecánicos”) está gobernada por la deformación plástica y la rotura en la zona de contacto. Así, la técnica de “pin-on-disk” permite caracterizar el desgaste en situaciones de deslizamiento, ya que al final de cuentas es una prueba de carácter fenomenológico que intenta reproducir situaciones de desgaste [12], donde pueden ocurrir transiciones en la tasa de desgaste influenciadas por la carga, velocidad y distancia.

2. Descripción del problema.

Los aceros avanzados de alta resistencia de fase compleja microaleados, son objeto de un intenso estudio científico debido a sus prometedoras propiedades mecánicas y a la libertad que existe en el acondicionamiento microestructural, aunque implique rutas de procesamiento térmico y termo-mecánicas complejas y difíciles de realizar. De aquí que sea necesario evaluar el efecto microestructural y mecánico sobre la tasa de desgaste de un acero experimental de fase compleja de bajo contenido de carbono de composición química base NiCrNbCu microaleado con boro en diferentes condiciones de tratamiento térmico y termo-mecánico mediante la técnica de “pin-on-disk”. La información que se generará puede concebir nuevas perspectivas en cuanto al concepto del diseño de componentes estructurales estampados con formas geométricas cada vez más complejas, unidas por métodos diferentes a la soldadura, para la industria automotriz.

3. Hipótesis.

Debido a que la adición de pequeñas cantidades boro en los aceros modifica la cinética de descomposición entre fases, mejora la templabilidad y facilita los procesos de deformación plástica, se espera obtener un efecto benéfico a través de la relación del acondicionamiento microestructural y de la resistencia al desgaste por desplazamiento, al considerarse mecanismos de endurecimiento y fenómenos de segregación de no-equilibrio del boro en los límites de grano, de tal manera que se mantenga la cohesión entre fases y se reduzcan las componentes de fragilización microestructural, tanto al interior del material como en su superficie.

4. Objetivos.

Objetivo general:

El objetivo principal de este trabajo de investigación es el de estudiar el comportamiento tribológico de un acero experimental avanzado de alta resistencia de fase compleja de bajo contenido de carbono de composición química base NiCrNbCu sin microalea y microaleado con 30 y 110 ppm de boro en diferentes condiciones de tratamiento térmico y termo-mecánico mediante la técnica de “pin-on-disk”.

Objetivos específicos:

- 1) Determinar la naturaleza microestructural de un acero experimental avanzado de alta resistencia de fase compleja de bajo contenido de carbono NiCrNbCu sin microalea y microaleado con 30 y 110 ppm de boro, en la condición de temple, temple y revenido, temple y partición (Q&P) y laminado en caliente.

- 2) Determinar las propiedades necesarias para realizar el estudio de desgaste por deslizamiento, tales como la dureza, la densidad y el perfil de rugosidad, así como los cálculos matemáticos implicados en tribología (condiciones de ensayo).
- 3) Realizar los ensayos de tribología mediante la técnica de “pin-on-disk”.
- 4) Determinar la cinética del desgaste al variar la carga y diferentes recorridos de velocidad (baja y alta).
- 5) Analizar los tipos de mecanismos de desgaste en el material mediante el empleo de técnicas microscópicas (MO y MEB), y sus propiedades mecánicas de rugosidad y dureza.
- 6) Caracterizar la superficie de desgaste mediante difracción de rayos-X para determinar la existencia de películas de óxido y transformaciones de fase tras cada ensayo de tribología.
- 7) Construir gráficas que relacionen la tasa de desgaste respecto de las diferentes variables consideradas en los ensayos de desgaste mecánico.

5. Metas.

- Se determinará la efectividad del acondicionamiento microestructural, por tratamiento térmico y termo-mecánico, así como el efecto del contenido de boro, en un acero experimental avanzado de alta resistencia de fase compleja de bajo contenido de carbono NiCrNbCu sin microalea y microaleado con 30 y 110 ppm de boro, respecto de su resistencia al desgaste mecánico.
- Se redactará un reporte de las actividades realizadas después de 16 semanas.
- Al final de la estancia de investigación, se tendrá un avance aproximado del 70% de la tesis que hará el estudiante.

6. Metodología de trabajo.

A partir de probetas tratadas térmicamente y laminadas en caliente, se maquinarán 12 especímenes cilíndricos con un diámetro de 20 mm por 8 mm de espesor. El pin corresponderá a un metal duro GD03 con valor de dureza Vickers de 30 GPa, el cual tiene una altura de 16 mm y un diámetro de 4 mm con radio de curvatura de 0.5 mm. Enseguida se medirá su densidad mediante el uso de una balanza de alta precisión, técnica basada en el principio de Arquímedes. Consecuentemente, se procederá con la preparación metalográfica hasta obtener superficies pulidas a espejo, para posteriormente aplicar el ataque químico. Se obtendrán una serie de micrografías representativas de cada probeta en cuestión y se determinará su valor de dureza Vickers inicial. La actividad siguiente será determinar la rugosidad de las muestras al emplear un rugosímetro mediante un procedimiento lineal. En general, los parámetros utilizados para cuantificar la rugosidad pueden interpretarse como parámetros propios de la distribución estadística de alturas del perfil o superficie bajo análisis. Por lo que será necesario, antes y después del

cada ensayo de desgaste mecánico, determinar el perfil de superficie, realizando por lo menos tres mediciones y obteniendo el valor promedio.

Una vez terminados los pasos anteriores, se efectuará el ensayo de desgaste empleando la técnica de “pin-on-disk” en un tribómetro marca Cygnus – Friction & Wear Testing Machine (equipo utilizado para investigar y simular los procesos de fricción y desgaste por deslizamiento), cuidando de asegurar que el pin GD03 esté colocado perpendicularmente al disco (muestra), de tal manera que el pin desliza sobre la superficie del disco. El desgaste producido en un ensayo tribológico depende varios factores como la carga, la velocidad de deslizamiento, la distancia de deslizamiento, el medio y las condiciones del material. Por lo que los ensayos “pin-on-disk” serán ejecutados en condiciones estándar de temperatura y humedad (aprox. 20 °C y 50% H₂O_(g)) empujando una carga de 5 N sin uso de lubricante. La variación de la velocidad de deslizamiento se realizará para determinar cómo se ven afectados los mecanismos de desgaste para diferentes recorridos. Las velocidades seleccionadas serán de 0.2 y 1.2 m/s; y las distancias recorridas serán de 500, 3000 y 5000 m, respectivamente. Para ello, se deben de seguir una serie de pasos que indican la manera de limpiar la superficie de ensayo, pesaje del pin y de los discos antes y después de cada ensayo, medición de la rugosidad, montar el pin y el disco en el tribómetro, realizar cálculos específicos, seleccionar los parámetros de ensayo en el software del equipo y ejecutar el ensayo. La materia desprendida (viruta desprendida) por el efecto de la fricción durante cada ensayo se recolectará en un recipiente adecuado y posteriormente se pesará y caracterizará.

Finalmente, para la caracterización de la superficie desgastada mediante microscopía, es muy importante señalar que la morfología de los mecanismos de desgaste es muy compleja y puede indicar varios tipos en función de las características del desgaste. Así, la pista formada durante los ensayos tribológicos puede contener particularidades tales como agujeros, incrustaciones, rayas finas, microgrietas, etc. Por lo tanto, el análisis microscópico de las muestras con superficies desgastadas es indispensable para correlacionar la tasa de desgaste. Para ello se empleará microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido y, para rastrear posibles efectos de transformación de fases, se empleará difracción de rayos-X.

El análisis de los resultados permitirá construir diagramas de cinética de desgaste que relacionen por un lado la distancia recorrida en función de la velocidad de desplazamiento respecto del volumen desgastado, así como ubicar zonas de transición a través de gráficas que comparen la velocidad de deslizamiento y la distancia de transición. Además, se hace importante determinar la evolución del coeficiente de fricción en función de la distancia recorrida para cada una de las velocidades empleadas en los ensayos.

7. Tipo de actividades a realizar.

- Revisión bibliográfica del tema en cuestión.
- Entrega de las probetas del acero de fase compleja de bajo contenido de carbono NiCrNbCu sin microalea y microaleado con 30 y 110 ppm de boro (3 probetas con temple, 3 probetas con temple y revenido, 3 probetas con temple y partición y 3 probetas laminadas en caliente; B0, B1 y B3, respectivamente).
- Capacitación en el uso del equipo de desgaste.
- Realización de los cálculos matemáticos necesarios para ejecutar el ensayo de desgaste mecánico de “pin-on-disk”.
- Diseño de la matriz de experimentos de desgaste mecánico.
- Ejecución y monitoreo de los ensayos tribológicos de desgaste mecánico.
- Recolección y pesaje de la pérdida de material y resguardo de las probetas ensayadas.
- Realización de ensayos de difracción de rayos-X.
- Caracterización metalográfica mediante microscopía óptica y electrónica de barrido.
- Caracterización superficial (rugosidad) y mecánica de las probetas ensayadas.
- Análisis de resultados.

8. Infraestructura.

- Consumibles (lijas de desbaste, pasta/solución de diamante, alcohol etílico, lubricante para pulir, paños y reactivos químicos) - Departamento de Ingeniería Metalúrgica (FQ-UNAM).
- Equipo de preparación metalográfica - Departamento de Ingeniería Metalúrgica (FQ-UNAM).
- Microscopio óptico con banco metalográfico - Departamento de Ingeniería Metalúrgica (FQ-UNAM).
- Equipo de desgaste mecánico “pin-on-disk” - Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (FI-UNAM).
- Rugosímetro - Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (FI-UNAM).
- Microscopio electrónico de barrido – a) Instituto de Investigación en Materiales (UNAM), b) Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación y a la Industria (USAI) (FQ-UNAM).
- Microidentador – a) Departamento de Ingeniería Metalúrgica (FQ-UNAM), b) Instituto de Investigación en Materiales (UNAM).
- Equipo de difracción de rayos-X - a) Instituto de Investigación en Materiales (UNAM), b) Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación y a la Industria (USAI) (FQ-UNAM).

9. Medidas de seguridad.

- Para manipular la máquina cortadora de disco abrasivo, las muflas y el manejo de sustancias químicas peligrosas (por ejemplo, ácidos empleados para preparar soluciones de ataque químico) del departamento de Ingeniería Metalúrgica, el alumno respetará lo estipulado en el reglamento de seguridad de la FQ-UNAM: uso de bata, uso de guantes, uso de lentes y de ser necesario uso de tapabocas.
- Para la realización de los ensayos de desgaste mecánico, se respetaran las normas internas del grupo de trabajo del Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (FI-UNAM).
- Para la realización de las técnicas de caracterización disponibles en el IIM-UNAM, de igual manera se respetaran las normas internas del Instituto.

10. Comentarios.

Es necesario resaltar que para que el alumno realice sin problemas el presente proyecto de investigación, el asesor (Dr. Antonio Enrique Salas Reyes) cuentan con el material (aceros de fase compleja de bajo contenido de carbono NiCrNbCu, sin microalea y microaleados con boro – 30 y 110 ppm), consumibles y recurso financiero (PAIP-UNAM) que garantizan la realización de cada actividad experimental en tiempo y forma. Así mismo, indicar el apoyo y las facilidades que brindará el **Dr. Miguel Ángel Hernández (supervisor técnico)** para realizar los ensayos de desgaste mecánico en sus instalaciones.

Es por ello que se adjunta copia de la carta de apoyo institucional por parte del grupo de trabajo del Dr. Hernández del CENISA.

11. Cronograma de actividades.

Actividades	Semanas							
	1 y 2	3 y 4	5 y 6	7 y 8	9 y 10	11 y 12	13 y 14	15 y 16
Revisión bibliográfica.	X	X	X				X	X
Desarrollo experimental.		X	X	X	X	X	X	
Análisis de resultados.				X	X	X	X	X
Escritura de reporte.							X	X

12. Referencias bibliográficas.

- [1] Acero Docol, High Strength Steel: “Aceros avanzados del alta resistencia para la industria de la automoción: Porque los coches seguros y ecológicos nunca pasarán de moda”, en: <http://brugsa.com.ar/wp-content/uploads/2014/12/docol-490.pdf>. Fecha de consulta: Mayo de 2018.

- [2] Mordor intelligence: “Automotive AHSS Market - Analysis of Growth, Trends, and Forecasts (2018 - 2023)”, Published in April 2018, in: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/automotive-ahss-market>. Fecha de consulta: Mayo de 2018.
- [3] Voestalpine Steel Division, AHSS classic: “Aceros de fase compleja”, publicado en noviembre de 2016, en: https://www.google.com.mx/search?q=Aceros+de+fase+compleja+%2B+voestalpine+Steel+Division+%2B+noviembre+de+2016+%2B+pdf&rlz=1C1CHZL_esMX760MX760&oq=Aceros+de+fase+compleja+%2B+voestalpine+Steel+Division+%2B+noviembre+de+2016+%2B+pdf&aqs=chrome..69i57j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8#. Fecha de consulta: Mayo de 2018.
- [4] F. Spenger, T. Hebesberger, A. Pichler, C. Krempaszy, E.A. Werner, AHSS steel grades: strain hardening and damage as material design criteria, in: J.G. Speer, B. Nelson, R. Pradhan (Eds.), International Conference on New Developments in Advanced High- Strength Sheet Steels, AIST, Orlando, Florida, 2008, pp. 39-49.
- [5] R. Rana, S.V. Singh: “Automotive steels: Design, metallurgy, processing and applications”, Elsevier and Woodhead Publishing, Chapter 8 and 13, 2017.
- [6] T. Heller, A. Nuss: “Effect of alloying elements on microstructure and mechanical properties of hot rolled multiphase steels”, Ironmaking & Steelmaking, 32 (2005) 303-308.
- [7] G. Altamirano-Guerrero: “Estudio de la deformación plástica en caliente de aceros avanzados de ultra alta resistencia (A-UHSS) microaleados con boro”, Tesis doctoral, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2014, Morelia, México.
- [8] M. Merklein, M. Wieland, M. Lechner, S. Bruschi, A. Ghiotti: “Hot stamping of boron steels with tailored properties: A review”, Journal of Materials Processing Technology, 228 (2016) 11-24.
- [9] D. Bublíková, Š. Jeníček, I. Vorel, B. Mašek: “New heat treatment process for advanced high-strength steels”, Materials Science and Engineering, 179 (2017) 1-9.
- [10] ASM Metals Handbook, Volume 18: “Friction, Lubrication and Wear Technology”, 1992.
- [11] G.W. Stachowiak, A.W. Batchelor: “Engineering tribology”, 2nd Ed., Oxford, Butterworth-Heinemann, 2001.
- [12] J.E. Cardona-Ospina, D. Cardona-Bedoya, D.H. Mesa-Grajales, A. Zuleta-Duran: “Reingeniería en máquina para desgaste tipo pin sobre disco”, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, 2016, ISSN 0122-1701, en: <http://docplayer.es/33631389-Reingenieria-en-maquina-para-desgaste-tipo-pin-sobre-disco.html>. Fecha de consulta: Mayo de 2018.