

## **Efectos de los diferentes parámetros y procesos sobre la resistencia al desgaste por deslizamiento de la familia Hastelloy.**

## **Effects of different parameters and processes on sliding wear resistance of the Hastelloy alloys.**

Ramón Alejandro López-Martínez<sup>1</sup>, Lázaro Abdiel Falcon-Franco<sup>1</sup>, Marco Arturo García-Rentería<sup>1</sup>, José Lemus-Ruiz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Facultad de metalurgia, Universidad Autónoma de Coahuila, carretera 57 km. 5, C.P. 25710, Monclova, Coahuila, México.

<sup>2</sup>Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales, Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, Avenida Francisco J. Mujica s/n, C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México

Autor de correspondencia: [lopezr@uadec.edu.mx](mailto:lopezr@uadec.edu.mx)

## Resumen

En este documento se hace una revisión bibliográfica de trabajos de investigación y artículos realizados hasta la actualidad sobre los efectos de diferentes procesos como tratamiento térmico, corrosión, soldadura, y atmosferas controladas, sobre la resistencia al desgaste, con la variación de los parámetros de carga, distancia y velocidad de la familia Hastelloy. Actualmente existe muy poca información sobre el tema, ya que, las investigaciones se concentran principalmente en las propiedades mecánicas de la aleación dejando de lado su resistencia al desgaste. Dependiendo de los distintos parámetros y procedimiento la resistencia al desgaste se ve sumamente afectada tanto positiva como negativamente. Se resaltan las condiciones y procedimientos más relevantes para obtener mejoras en la resistencia al desgaste, además de los mecanismos de desgaste presentes en cada uno.

**Palabras clave:** Hastelloy, resistencia al desgaste, tratamiento térmico, corrosión, soldadura.

## Abstract

In this document, a bibliographic review of research works and articles carried out to date is made on the effects of different processes such as heat treatment, corrosion, welding, and controlled atmospheres, on wear resistance, with the variation of load parameters, distance, and speed of the Hastelloy family. Currently there is very little information on the subject, since research focuses mainly on the mechanical properties of the alloy, leaving aside its wear resistance. Depending on the different parameters and procedure, wear resistance is greatly affected both positively and negatively. The most relevant conditions and procedures to obtain improvements in wear resistance are highlighted, in addition to the wear mechanisms present in each one.

**Keywords:** Hastelloy, wear resistance, heat treatment, corrosion, welding.

## **Introducción**

Las aleaciones Hastelloy fueron creadas por haynes international. Son aleaciones que contienen una base de níquel, aleado con cobalto, cromo, y molibdeno.

Las aleaciones de la familia Hastelloy son costosas, pero tienen características muy particulares como alta resistencia a altas temperaturas (alrededor de 1100 °C), además, poseen muy buena resistencia a la corrosión y al desgaste. Es por estas características que se utilizan en turbinas de gas, motores de aviones, y también en reactores químicos. Las aleaciones de la familia Hastelloy son muy duras, pero a su vez son muy difíciles de maquinarse (usualmente se utiliza láser). Hay subtipos dentro de la aleación indicadas por letras y números.

Las propiedades anteriormente mencionadas hacen que estas aleaciones sean ampliamente utilizadas en diversos ámbitos, lo que hace que existan una amplia variedad de pruebas y parámetros que han ido variando con la época, un ejemplo es que en la actualidad se hacen pruebas mecánicas a dichas aleaciones previamente expuestas a atmósferas criogénicas.

Pero existe una propiedad de estas aleaciones que ha sido poco estudiada y esa es la resistencia al desgaste por deslizamiento, hay muy pocos estudios sobre la resistencia al desgaste de la familia Hastelloy, es por lo mencionado que este review recopilará los más recientes estudios sobre esta propiedad y se observará el comportamiento de las aleaciones de la familia Hastelloy ante este tipo de pruebas.

## **Pruebas de desgaste en seco.**

Las pruebas de desgaste en seco son de suma importancia, puesto que gracias a ellas obtenemos una serie de datos de interés, entre ellos establecer una base preliminar para futuros ensayos con lubricante y con ello, permitir la comparación con otras investigaciones donde se utilizó lubricante, además, las pruebas de

desgaste deben de ser lo más parecido a las condiciones reales y existen aplicaciones en donde no se utiliza ningún tipo de lubricante.

Venkatesan y col. (2020) realizaron un estudio del rendimiento de la maquinabilidad de la aleación Hastelloy X. El estudio examina y realiza una comparación entre desgaste en seco y lubricación por cantidad mínima (MQL) en la propiedad de maquinabilidad de Hastelloy X con una deposición de vapor (PVD: TiAlN). Los resultados revelan que el 0.25 % en peso con MQL PVD mostró una mejora en la fuerza de giro (5-18 %), rugosidad (40-4 %), desgaste en la punta de la herramienta (37.5-9 %), coeficiente de fricción por (32-40%) (Venkatesan, 2020).

Un grupo de investigadores liderados por Calvin Samuel y col. (2022) estudiaron la microestructura, el rendimiento tribológico a alta temperatura y las propiedades mecánicas de la aleación Hastelloy X a la que se le aplicó un tratamiento de envejecido en solución. La microestructura después del envejecido en solución revela una microestructura bimodal  $\alpha$  y  $\beta$  con precipitados  $\alpha$  uniformemente dispersos en la fase de matriz  $\beta$ . Las pruebas de desgaste se realizaron a diferentes temperaturas (28, 250, 350 y 450 °C) en un tribómetro pin-on-disc. Los mecanismos de desgaste se evaluaron en la superficie desgastada utilizando un microscopio electrónico de barrido (MEB). Existe un desgaste abrasivo predominante en temperaturas de 28 y 250 °C, mientras que la oxidación y la delaminación son dominantes a temperaturas de 350 y 450 °C. Se formó un producto triboquímico (tribóxido) a 350 y 450 °C que proporciona una mejor resistencia al desgaste del material (Calvin Samuel y col., 2022).

Banamali y col. (2020) han abordado el análisis de corrosión y desgaste por deslizamiento de Hastelloy C276 para el desgaste por deslizamiento en seco contra un acero inoxidable EN 31(60 HRC) a 298°K. la fuerza de fricción, el coeficiente de fricción y la velocidad de desgaste en la superficie del material a diferentes distancias de deslizamiento se examinan en diferentes condiciones de carga. En la

prueba de desgaste con carga de 40 N, la tasa de desgaste se vio aumentada un 300% en comparación con las pruebas de 10 y 20 N. los resultados experimentales indicaron una reducción en los valores del coeficiente de fricción con el aumento de la carga normal. Las imágenes del microscopio electrónico de barrido (MEB) de la superficie desgastada confirman la aparición de delaminación y adhesión, esto hace que el material se retire de la superficie en el deslizamiento en seco (Banamali y col., 2020).

Anandakrishnan y col. (2020) estudiaron el comportamiento al desgaste en seco de la aleación Inconel 718 fabricada por DMLS. El comportamiento de desgaste de las muestras de Inconel 718 fabricadas por DMLS se investigó experimentalmente utilizando un pin-on-disk estándar. Entre los variados parámetros de desgaste, la carga se identificó como el parámetro más influyente en la velocidad de desgaste. Además, la caracterización realizada por microscopía electrónica de barrido reveló la presencia de varios mecanismos de desgaste entre los cuales el más predominante es el adhesivo (Anandakrishnan y col., 2020).

Un grupo de trabajo liderado por Singh y col. en el 2020 realizaron pruebas de resistencia al desgaste por deslizamiento en seco de los compuestos Ni-SiC desarrollados por fundición. La formación de compuestos intermetálicos duros y la presencia de refuerzo SiC produjeron una mayor microdureza. Las pruebas de desgaste en seco con diferentes condiciones de carga y velocidad revelaron la formación de tribolayers de óxido estable a 1.0 m / s de velocidad deslizante y 15 N de carga. La fractografía de muestras desgastadas reveló la abrasión de superficies en la condición de carga inferior (10 N). Sin embargo, al aumentar la carga, se observó el cizallamiento de las superficies debido a la adhesión. A cargas más altas (20 N) y velocidades deslizantes más altas (1.5 m / s), se observaron extracción de partículas y tres mecanismos de desgaste abrasivo (Singh y col., 2020).

## **Desgaste y corrosión**

La integridad física y la composición de un material en estado sólido puede verse alterada en un ambiente corrosivo debido a la corrosión y desgaste de los materiales. Según un estudio de 2001 realizado en Estados Unidos, la lucha contra la corrosión de los materiales supone aproximadamente el 6% del producto interno bruto del país. Así, la corrosión es una importante consideración en muchos sectores industriales tales como el transporte, servicios públicos y la manufactura.

Sin embargo, existen aplicaciones en las que la oxidación o corrosión son buscadas para sacarles provecho. Por ejemplo, las superficies ultraplanas de obleas de silicio para chips de ordenadores se basan en procesos de corrosión y erosión químicas. También existen aplicaciones médicas que usan la degradación de ciertos biopolímeros para disolver suturas.

En un estudio mencionado en una de las secciones anteriores, Banamali Dansana y su equipo, aparte de las pruebas de desgaste en seco, estudiaron el comportamiento de desgaste por corrosión en ácido sulfúrico, el cual, mostró un valor significativamente menor de la tasa de corrosión (0.0016579 mm / a en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solución) en comparación con otras aleaciones utilizadas con frecuencia a nivel industrial (Dansana y col., 2020).

## **Mecanismos de desgastes presentes en aleaciones Hastelloy.**

Los mecanismos de desgaste se refieren a las formas en las cuales se presenta el desgaste y permite distinguir entre diferentes tipos de daños, los mecanismos de desgaste están regidos por normas, entre las cuales una de las más utilizadas en la norma alemana DIN 50320 que maneja cuatro tipos de desgaste que son adhesión, abrasión, reacción triboquímica y fatiga superficial.

Wang y Gao (2019) realizaron cálculos del factor de intensidad de la tensión para el desgaste por deslizamiento y la fatiga combinados de la superaleación HX basado en una simulación tridimensional. Propusieron una metodología de desgaste por fatiga por deslizamiento. Las características de propagación de grietas de la superaleación HX en condiciones de fatiga simple y desgaste por fatiga por deslizamiento se investigaron mediante pruebas de fatiga y MEB. Además, el análisis de desgaste se realizó con el programa de elementos finitos ABAQUS y el software de análisis de fractura tridimensional FRANC3D. Los factores de influencia de la tasa de crecimiento de grietas, incluida la tensión de flexión, la tensión de contacto y la profundidad de desgaste, se investigan en función del factor de intensidad de la tensión. Los resultados muestran que la resistencia a la fatiga se reduce severamente de 780 MPa a 200 MPa debido al desgaste. Los autores discutieron la existencia entre la fatiga y el desgaste y se concluye que la fatiga vence el efecto de resistencia del desgaste y ocupa la posición dominante después de que la cantidad de fisuras alcanzan un valor crítico. Sin embargo, el volumen y la profundidad del desgaste aumentarían el esfuerzo de fatiga y acelerarían la propagación de grietas (Wang & Gao, 2019).

Durante la investigación realizada por Sathisha y col. (2018) en la cual realizaron un estudio del desgaste por deslizamiento a alta temperatura en componentes de combustores de turbinas de gas. Se utilizó un tribaloy-800 basado en cobalto rico en molibdeno para abordar los problemas de desgaste y se estudió con mayor detalle. Se utilizó una configuración de desgaste por rozamiento personalizada para realizar la prueba de desgaste por deslizamiento grueso, ya que los experimentos de laboratorio estándar pueden no simular mejor los mecanismos de desgaste de campo. Las pruebas se realizaron a 550 °C bajo tensión constante hasta 3 millones de ciclos para producir una tasa de desgaste constante. Los datos de desgaste por fricción revelaron mecanismos de desgaste de tipo excoiación severa en este

material que conducen a una rápida eliminación del material de la superficie (Sathisha, 2018).

### **Resistencia al desgaste en soldadura.**

La soldadura es un proceso de unión de materiales metálicos, usualmente logrado a través de la coalescencia (fusión), en la cual las piezas son soldadas fundiendo, se puede agregar un material de aporte, al usar calor en la soldadura se produce un cambio en la microestructura, además de una conducción del calor a través del metal, es por eso por lo que es necesario hacerle pruebas de desgaste para saber si existe algún cambio en la eficiencia del trabajo de la pieza.

Se han realizado pruebas por fusión con láser oscilante circular de una superaleación a base de níquel reforzada con WC, en el estudio realizaron el análisis de microestructura y resistencia al desgaste. Las principales fases de los recubrimientos compuestos son solución sólida de  $\gamma$ -Ni, WC, W<sub>2</sub>C y M<sub>6</sub>C. Las partículas de WC distribuidas uniformemente en la matriz GH3536 tienen los efectos del fortalecimiento por grano fino y el fortalecimiento por la dispersión. El mecanismo de desgaste cambia de desgaste adhesivo a desgaste abrasivo después de agregar WC. Las partículas de WC tienen protección física lo que la hace que sea más difícil de separarse durante las pruebas de desgaste y efectos de fortalecimiento por solución sólida, y mejoran la resistencia a la corrosión del revestimiento GH3536. Recapitulando, las ventajas del WC son que fortalecen el grano fino, cambia los mecanismos de desgaste lo que trae consigo mayor tiempo de vida, mejora la resistencia a la corrosión (Xia y col., 2021).

Faghani Gholamreza (2020) realizó un estudio para evaluar el comportamiento al desgaste, oxidación y corrosión de recubrimientos en las aleaciones Colmonoy 6, Inconel 625 y Hastelloy C276 soldadas por GTAW. La evaluación de la dureza, el comportamiento de desgaste y el mecanismo de desgaste de las muestras se realizó con el tribómetro pin-on-disc y usando imágenes SEM, respectivamente.

También se estudió el comportamiento de oxidación a alta temperatura a 1050 °C en 8 ciclos de 24 horas. Además, para investigar el comportamiento de corrosión de las muestras, se utilizó la prueba de polarización potenciodinámica en una solución de ácido sulfúrico y cloruro de sodio. El mejor comportamiento al desgaste se relacionó con Hastelloy C276 con un coeficiente de fricción de 0,28. Los estudios de morfología superficial de las muestras mostraron un cambio en el mecanismo de resistencia al desgaste del tipo por deslizamiento a adhesivo, al aplicar recubrimientos a base de níquel sobre el acero inoxidable 310. En la prueba de oxidación a alta temperatura, calcularon la ganancia de peso mínima para Hastelloy C276 (0,5 mg/cm<sup>2</sup>) (Faghani, 2020).

### **Desgaste en atmosferas criogénicas.**

Las aleaciones de la familia Hastelloy han sido ampliamente utilizadas en la industria aeroespacial, industria donde se someten a ambientes altamente demandantes entre ellos a temperaturas criogénicas, es por ello por lo que se ha estudiado el comportamiento de estas aleaciones al ser expuestas a estos ambientes.

Ekambaram (2019) realizó un estudio de propiedades mecánicas y metalúrgicas de Hastelloy X en condiciones criogénicas (-196 °C). Los efectos fueron estudiados cuando el material fue tratado bajo 12 y 24h de temperatura criogénica, respectivamente. Los resultados indicaron que el Hastelloy X criotratado había conservado las propiedades mecánicas y metalúrgicas a temperatura bajo cero. encontraron una disminución del 10% en la dureza de las muestras tratadas criogénicamente en comparación con las muestras sin procesar, la disminución de la dureza provocó un aumento en la resistencia a la tracción de la muestra. El tratamiento criogénico aumento el tamaño del grano debido a la aparición de recristalización. Pero se confirmó con DRX que no hubo cambios importantes en la estructura del grano (Ekambaram, 2019).

Un equipo de investigadores liderado por Sitki A. realizó un experimento sobre la rugosidad de la superficie en la aleación Hastelloy C22. Este estudio evaluó la maquinabilidad de una súper aleación a base de níquel aleada con molibdeno utilizando insertos cerámicos tratados criogénicamente ( $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $-145\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) en condiciones de torneado en seco. Tres velocidades de corte (350, 400 y 450 m/min), tres velocidades de alimentación (0.1, 0.2 y 0.3 mm/rev), y se utilizó una profundidad de corte fija 1 mm en las pruebas de giro. Los experimentos se realizaron utilizando la matriz ortogonal Taguchi. Los factores que afectan la rugosidad de la superficie ( $R_a$ ) se determinaron mediante análisis de varianza. Se investigó el efecto del tipo de tratamiento criogénico (superficial y profundo), la velocidad de corte y la velocidad de alimentación en la rugosidad de la superficie. Los resultados del análisis determinaron que la velocidad de alimentación era el parámetro principal que afectaba la rugosidad de la superficie y que el tratamiento criogénico profundo era más efectivo. El parámetro más efectivo que afectó la rugosidad de la superficie fue la velocidad de corte con una contribución del 57.9%. (Sitki, 2020).

En una colaboración entre Kesavan y Senthilkumar en 2020 en donde se realizaron pruebas sobre el mecanizado criogénico de la aleación Hastelloy C276 caracterizando su desgaste. La súper aleación exhibe un gran comportamiento de resistencia y fatiga cuando el níquel (Ni) está presente en grandes cantidades. Además, posee un buen comportamiento corrosivo resistente a altas temperaturas. En este trabajo, el mecanizado se realizó en Hastelloy C276 en diversas condiciones de mecanizado (velocidad, alimentación y profundidad) y entornos (secos y criogénicos). La maquinabilidad de Hastelloy C276 se investigó con fuerzas de mecanizado, temperatura, rugosidad superficial y dureza en diferentes condiciones de corte. Las fuerzas de mecanizado fueron mínimas bajo mecanizado criogénico debido a su efectiva propiedad de lubricación. El acabado superficial del área mecanizada mejoró en aproximadamente un 26% en condiciones criogénicas. Durante la investigación llegaron a la conclusión de que el mecanizado seco y

criogénico mejoró la dureza del material de trabajo. Además, se observaron adherencias y desgaste por abrasión mínimamente en el mecanizado criogénico en comparación con el mecanizado en seco. Pero no se observó una diferencia significativa en el desgaste de la muesca para ambos tipos de mecanizado (Kesavan & Senthilkumar, 2020).

### **Desgaste post tratamiento térmico**

Los tratamientos térmicos son procesos de calentamiento y enfriamiento controlados en los cuales se obtienen cambios en la microestructura que provocan una mejora en las propiedades mecánicas. En las superaleaciones existen tres tipos de tratamientos térmicos como lo son envejecido, solubilizado y precipitación.

En el año 2019 se realizaron una serie de estudios por Jinoop y col. sobre el efecto del post-tratamiento térmico sobre la microestructura de Hastelloy X fabricadas mediante deposición de energía dirigida basada en láser. La microscopía óptica muestra microestructuras con dendritas finas en condiciones de construcción debido a una mayor velocidad de enfriamiento durante la deposición, mientras que se observan granos equiaxiales recristalizados después del tratamiento térmico posterior (a 1177°C) debido a la recristalización. La topografía de la superficie revela la reducción de la rugosidad media con el post-tratamiento térmico. Los estudios de pin-on-disk de ciclo único indicaron un aumento en la capacidad de almacenamiento de energía en un factor de 55% después del tratamiento térmico posterior. Además, los estudios de propagación de grietas indican una mejora en la vida de fatiga después del tratamiento térmico posterior, mientras que la tasa de desgaste específico aumentó en un 72% con una mayor delaminación en las muestras tratadas térmicamente (Jinoop y col., 2019).

Un equipo de investigadores liderados por Pauzi (2018) investigaron las características del desgaste presentes en la boquilla de combustible de turbinas de gas a diferentes temperaturas de contacto (25, 100, 200°C). El principal objetivo del

trabajo fue investigar el efecto tribológico sobre la pérdida de volumen y el coeficiente de desgaste de la superficie de contacto del revestimiento de combustión de la boquilla de combustible de la turbina de gas a diferentes temperaturas. El ensayo tribológico fue llevado a cabo utilizando un tribómetro pin-on-disk en condiciones de deslizamiento aplicando tres temperaturas de contacto diferentes a una velocidad de deslizamiento constante y una carga aplicada. Todas las pruebas se realizaron a una velocidad constante de 200 rpm, cargas aplicadas de 19.61 N y 156.91 N, y una distancia de deslizamiento de 100 mm. Las cargas aplicadas de 2 kg (19.61 N) es la carga exacta de la superficie de contacto en turbina de gas. Las superficies desgastadas se investigaron utilizando un microscopio electrónico de barrido (SEM) los tipos de desgastes encontrados son el abrasivo y el adhesivo. Al finalizar el trabajo encontraron una transición del mecanismo de desgaste al aumentar la temperatura. A baja temperatura, 25°C y 100°C, se presentó el mecanismo de desgaste adhesivo, mientras que cuando la temperatura llegaba hasta 200°C, el desgaste abrasivo era el mecanismo principal. El desgaste adhesivo y el desgaste abrasivo fueron el mecanismo predominante en las superficies de contacto entre la boquilla de combustible y el revestimiento de combustión (SS304-Hastelloy X tribopais) (Pauzi, 2018).

El efecto de diferentes rutas de tratamiento térmico fue estudiado por Osmar Custodio y col. (2022) Se probaron tres condiciones de tratamiento térmico: doble envejecido, solubilizado y doble envejecido, y homogeneizado, solubilizado y doble envejecido. Estas condiciones se compararon entre sí y con las muestras construidas. Las muestras solubilizadas y de doble envejecimiento exhibieron una característica recristalizada, sin embargo, aún contenían una estructura dendrítica. Mientras que las muestras homogeneizadas, solubilizadas y de doble envejecimiento deleitaban los granos equiaxiales con el reemplazo total de las dendritas. El coeficiente de fricción para todas las condiciones fue estadísticamente igual, sin embargo, las condiciones solubilizadas y de doble envejecimiento y

homogeneizadas, solubilizadas y de doble envejecimiento mostraron mejores resultados de pérdida de desgaste (alrededor del 25% inferior) en comparación con la condición de construcción, mientras que la condición de doble envejecimiento mostró resultados estadísticamente iguales en relación con los demás. Los mecanismos de desgaste eran predominantemente adhesivos para las condiciones construidas, adhesivos y abrasivos para las muestras de doble envejecimiento y en su mayoría abrasivos para las muestras solubilizadas y de doble envejecimiento y homogeneizadas, solubilizadas y de doble envejecimiento. Los resultados presentados confirmaron la necesidad de tratamiento térmico para mejorar la dureza del recubrimiento y, además, Se puede concluir que las diferentes rutas de tratamiento térmico no tuvieron impactos significativos en la resistencia al desgaste. Por lo tanto, es posible suponer que la ruta de doble envejecimiento es la más adecuada, desde el punto de vista de la resistencia al desgaste (Osmar y col., 2022).

## **Conclusiones**

Con toda la información analizada en esta revisión se puede llegar a una serie de conclusiones generales de las aleaciones de la familia Hastelloy.

- En pruebas en seco, predomina el desgaste abrasivo, a temperaturas de 250 °C existe oxidación y delaminación como predominantes, además, a 35 0°C se forman capas de productos triboquímicos.
- La fatiga predomina a bajas cargas, al aumentar las cargas el desgaste se empieza a presentar.
- La resistencia al desgaste aumenta con el tiempo de envejecimiento debido a la mayor precipitación de la fase gamma principal.
- Los entornos criogénicos no suponen una caída en las propiedades mecánicas de la aleación, y solo disminuye en un 5% la resistencia al desgaste.

## Bibliografía

Anandakrishnan, V., Sathish, S., Muthukannan, D., Dillibabu, V., & Balamuralikrishnan, N. (2020). Dry sliding wear behavior of Inconel 718 additively manufactured by DMLS technique. *Industrial Lubrication and Tribology*. 72(4): 491-496. DOI: <https://doi.org/10.1108/ILT-08-2019-0322>

Banamali, D., Mahapatra, T. R., Sahu, P., & Sahu, S. K. (2020). Tribological and electrochemical corrosion performance analysis of Hastelloy X under different loading conditions. *Materials Today: Proceedings*. 24(1): 1434-1444. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.462>

Calvin Samuel, S., Arivarasu, M., & Ram Prabhu, T. (2022). High-Temperature Solid Particle Erosion Behavior of Laser Powder Bed Fused Inconel 718. *Journal of Tribology*. 144(9): 705-720. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4054052>

Dansana, B., Mahapatra, T. R., Sahu, P., & Sahu, S. K. (2020). Tribological and electrochemical corrosion performance analysis of Hastelloy X under different loading conditions. *Materials Today: Proceedings*. 24(1): 1434-1444. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.462>

Ekambaram, P. (2019). Study of mechanical and metallurgical properties of Hastelloy X at cryogenic condition. *Journal of Materials Research and Technology*. 8(6): 6413-6419. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.048>

Faghani, G. (2020). Evaluation of Wear, Oxidation and Corrosion Behaviors of Nickel-Based Superalloy Coatings Fabricated by GTAW Method. *Iranian Journal of Surface*. Disponible en: [https://www.iranjme.ir/article\\_95986.html](https://www.iranjme.ir/article_95986.html). Fecha de consulta: enero 4, 2024

Jinoop, A. N., Denny, J., Paul, C. P., Kumar, J. G., & Bindra, K. S. (2019). Effect of post heat-treatment on the microstructure and mechanical properties of Hastelloy-X structures manufactured by laser based Directed Energy Deposition. *Journal of Alloys and Compounds*. 797: 399-412. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.05.050>

Kesavan, J., & Senthilkumar, V. (2020). Experimental investigations on cryo-machining of Hastelloy C-276 with tool wear characteristics. *Sādhanā*. 45(1): 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12046-020-01477-0>

Osmar, C., Pacheco, J. T., Veiga, M. T., Teixeira, M. F., da Silva, L. J., da Costa, C. E., & Milan, J. C. (2022). Effect of Different Heat Treatment Routes on the Tribological Behavior of the Inconel 718 Alloy Deposited on AISI 316 L by Laser Cladding. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*. 9(2): 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40516-022-00166-6>

Pauzi, A. A., Ghazali, M. J., Yunus, S. M., Zamri, W. W., Azhari, C. H., & Husin, S. (2018, September). Wear characteristics on gas turbine fuel nozzle-combustion liner contacting surface at different contact temperatures. In *Proceedings of Asia International Conference on Tribology 2018*. 2018: 40-42. Disponible en: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=LDFqDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA40&dq=Wear+characteristics+on+gas+turbine+fuel+nozzle+combustion+liner+contacting+surface+at+different+contact+temperatures&ots>. Fecha de consulta: 4 enero, 2024

Sathisha, CH. (2018). Materials Solutions to Address High Temperature Fretting Wear in Gas Turbine Combustor Components. In *Proceedings of TRIBOINDIA-2018 An International Conference on Tribology*. 13(1): 1-7. DOI: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3397894>

Singh, S., Gupta, D., & Kaushal, S. (2020). Dry sliding wear performance of Ni–SiC composites developed through an in situ microwave casting process. *Journal of Tribology*. 142(10): 101704-101714. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4047032>

Sitki, A., Gökkaya, H., Akincioğlu, G., & Karataş, M. A. (2020). Taguchi optimization of surface roughness in the turning of Hastelloy C22 super alloy using cryogenically treated ceramic inserts. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: *Journal of Mechanical Engineering Science*. 234(19): 3826-3836. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954406220917708>

Venkatesan, K., Devendiran, S., Nishanth Purusotham, K., & Praveen, V. S. (2020). Study of machinability performance of Hastelloy-X for nanofluids, dry with coated tools. *Materials and Manufacturing Processes*. 35(7): 751-761. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426914.2020.1729990>

Wang, J., & Gao, Y. (2019). The stress intensity factor calculation for combined sliding wear and fatigue of GH4169 superalloy based on three-dimensional simulation. *Wear*. 436(1): 203012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203012>

Xia, Y., Chen, H., Liang, X., & Lei, J. (2021). Circular oscillating laser melting deposition of nickel-based superalloy reinforced by WC: Microstructure, wear resistance and electrochemical properties. *Journal of Manufacturing Processes*. 68: 1694-1704. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.074>