

Efecto de los procesos de soldadura sobre la microestructura y las propiedades mecánicas en aleaciones Ni - Cr- Mo: Estado del arte.

Gustavo Andrés Pinzón Suárez

Trabajo de grado para Optar por el título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Mauricio Rincón Ortiz

Dr. en Ciencia y tecnología de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los materiales

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

A Dios por ser mi soporte en los momentos de angustia y permitirme culminar una etapa más de mi vida.

A mi papá, mi mamá y mi hermana por siempre creer en mí, apoyarme sin importar la situación y tenerme tanta paciencia en los días que ni yo mismo me toleraba.

A mis abuelos Hector y Lida, mi nono Enrique y mis amigos Juan Sebastián Villamizar, Adrian García y Pablo Kopp quienes no me acompañan físicamente en este logro alcanzado, pero se que desde el cielo me cuidan y animan a seguir adelante.

Gustavo Andrés Pinzón Suárez

Agradecimientos

A mi familia paterna y materna por nunca dudar de mí y brindarme siempre palabras de ánimo.

A mis amigos Nicolas Fonseca, Andrés Ronderos, Jorge Gómez, Juan Pablo Bohórquez, Jonathan Guarín, Julián Medrano, Diego Tirado, Esteban Salazar y Nicolas Nieto quienes siempre me motivaron a seguir adelante y a nunca rendirme ante ninguna dificultad.

A mis amigas Eliana Mantilla, Sandra Carvajal, Ada Rozo, Natalia Chacón, Nathalia Tinjaca, Angie Torres, Karen Estupiñán, Camila Velásquez, Silvia Matajira, Maure Muñoz, Viviana Vargas, Daniela Tarazona, Diana Rodriguez, Laura Arenas y mi bfis Mafe por tenerme tanta paciencia y ayudarme a crecer como persona.

Al profesor Mauricio Rincón Ortiz por confiar en mis capacidades y orientarme durante el desarrollo del proyecto con sus consejos y recomendaciones.

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander por la formación y también por brindarme las herramientas necesarias a través del proyecto No.2685, titulado “Evaluación de la resistencia a la corrosión en presencia de cloruros de aceros inoxidables súper dúplex para uso en desalinizadores de agua de mar” para el desarrollo de mi trabajo de grado.

A todos los que siempre tuvieron fe en mí, muchas gracias.

Gustavo Andrés Pinzón Suárez

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Objetivos	12
1.1 Objetivo General	12
1.2 Objetivos Específicos	12
2. Aleaciones Ni – Cr – Mo	13
3. Procesos de soldadura empleados en las aleaciones Ni – Cr – Mo	21
3.1 Soldadura por arco eléctrico con electrodo de tungsteno y protección gaseosa	22
3.2 Soldadura láser	23
3.3 Soldadura por haz de electrones	24
3.4 Soldadura por plasma	24
4. Cambios microestructurales de las aleaciones Ni-Cr-Mo post soldadura y su relación con las propiedades mecánicas	25
4.1 Procesos de endurecimiento en aleaciones Ni-Cr-Mo	27
4.2 Fallas mecánicas (agrietamientos) y fases indeseadas formadas durante los procesos de soldadura de aleaciones Ni-Cr-Mo	30
4.3 Carburos	34
4.4 Fases topológicamente compactas	37
4.5 Zonas de reacción secundaria	39
4.6 Actualidad ante la problemática de las fallas mecánicas y fases indeseadas	41

5. Conclusiones	43
Referencias Bibliográficas	45

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Tipos de aleaciones Hastelloy con sus principales características y aplicaciones	19
Tabla 2.Composición química de los diferentes tipos de aleaciones Hastelloy presentadas en la tabla 1	20
Tabla 3. Procesos de soldadura por arco implementados en los diferentes tipos de aleaciones Hastelloy	22
Tabla 4. Resumen general de los efectos de distintos elementos en la estabilidad de fases y precipitados en las superaleaciones base níquel	40

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1.Efecto de los elementos de aleación mayoritarios y minoritarios en las aleaciones base níquel	14
Figura 2.Efecto de los diferentes elementos de aleación en las superaleaciones base níquel	18
Figura 3.Estructura cristalina de la matriz gamma (γ)	26
Figura 4.Estructura cristalina de la fase gamma prima (γ')	27
Figura 5.Micrografía de un precipitado cuboidal posterior a un envejecimiento	29
Figura 6.Micrografía de un agrietamiento en caliente en una aleación Hastelloy C-276	33
Figura 7.Presencia de carburos y fase γ' en la microestructura de superaleaciones base níquel ...	35
Figura 8.Micrografía de partículas de carburo $M_{23}C_6$ en el límite de grano desde la parte izquierda inferior a la derecha superior	36
Figura 9.Ejemplificación de la ubicación de los carburos M_6C y $M_{23}C_6$ en la microestructura de la aleación.....	36
Figura 10.Diagrama ternario del sistema Ni-Cr-Mo a 1250°C	38
Figura 11.Micrografía de una aleación base níquel donde se pueden identificar la fase TCP y la SRZ.....	40

Resumen

Título: Efecto de los procesos de soldadura sobre la microestructura y propiedades mecánicas en aleaciones Ni-Cr-Mo: Estado del arte*

Autor: Gustavo Andrés Pinzón Suárez**

Palabras claves: Procesos de soldadura, propiedades mecánicas, aleaciones, microestructura

Descripción:

Las superaleaciones base níquel son aleaciones compuestas por una matriz rica en níquel y una adición de elementos como Fe, Cr, Ti, Mo, W, Ta, B, entre otros, con el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas, químicas y térmicas. Dentro de las superaleaciones base níquel se encuentra un grupo de aleaciones muy estudiado en los últimos años por sus óptimas propiedades en entornos bastante exigentes como son las Hastelloy, caracterizadas por su composición química donde destacan elementos como: níquel, cromo y molibdeno. Las aleaciones Ni-Cr-Mo tienen una amplia aplicación en diversas industrias como química, petroquímica, aeronáutica, espacial y nuclear por su alto desempeño en condiciones de operación severas como altas temperaturas y/o ambientes corrosivos. A pesar de las excelentes propiedades que presentan y los grandes avances que se han expuesto con base a su rendimiento, aún se siguen evidenciando algunos problemas en el comportamiento mecánico y en la resistencia a la corrosión luego de la aplicación de procesos de soldadura. Dado lo anterior, se realizó este proyecto con el fin de identificar y analizar los efectos de los diferentes procesos de soldadura implementados en las aleaciones Ni-Cr-Mo sobre las propiedades mecánicas del metal con respecto a las microestructuras presentadas, por medio de una exhaustiva revisión bibliográfica.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Mauricio Rincón Ortiz, Doctor en Ciencia y Tecnología Mención Materiales.

Abstract

Title: Effect of welding processes on the microstructure and mechanical properties of Ni-Cr-Mo alloys: State of the art*

Author: Gustavo Andrés Pinzón Suárez**

Keywords: Welding processes, mechanical properties, alloys, microstructure.

Description:

Nickel-based superalloys are alloys composed of a nickel rich matrix and an addition of elements such as Fe, Cr, Ti, Mo, W, Ta, B, among others, with the aim of improving mechanical, chemical, and thermal properties. Within the nickel-based superalloys there is group of alloys that has been highly studied in recent years for their optimal in quite demanding environments such as Hastelloy, characterized by its chemical composition where elements such as nickel, chromium and molybdenum stand out. Ni-Cr-Mo alloys have a wide application in various industries such as chemical, petrochemical, aeronautical, space and nuclear due to their high performance in severe operating conditions such as high temperatures and/or corrosive environments. Despite the excellent properties they have and the great advances that have been made based on their performance, there are still some problems in mechanical behavior and corrosion resistance after the application of welding processes. Given the above, this project was carried out in order to identify and analyze the effects of the different welding processes implemented in Ni-Cr-Mo alloys on the mechanical properties of the metal with respect to the microstructures, through an exhaustive bibliographic review.

*Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Mauricio Rincón Ortiz, Doctor en Ciencia y Tecnología Mención Materiales.

Introducción

Las aleaciones Ni-Cr-Mo son también llamadas superaleaciones por tener las dos principales características de estos materiales: alta resistencia a la corrosión y a altas temperaturas. Las superaleaciones base níquel presentan una microestructura que consta de una matriz de níquel con estructura cristalina cúbica centrada en las caras (FCC) conocida como gamma (γ), fases secundarias que mejoran su resistencia mecánica y a altas temperaturas como gamma prima (γ'), el precipitado $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ según la aleación y varios tipos de carburos. Dentro de estas aleaciones destacan las Hastelloy, que en la actualidad son muy utilizadas para la fabricación de piezas o equipos que trabajan en entornos exigentes y por ello son aplicadas en industrias como la aeroespacial, aeronáutica, nuclear, química y petroquímica. (Griffiths, 2019; Yonezawa, 2012). Este grupo de aleaciones fueron desarrolladas con el objetivo de soportar temperaturas superiores a los 1000 °C y resistir la corrosión de ácidos fuertes sin perder sus propiedades particulares, siendo consideradas como las aleaciones con mejor resistencia general a la corrosión y más resistentes mecánicamente del mundo (Ray et al, 2020).

Debido al gran avance de distintas industrias en utilizar materiales que cumplan sus funciones en ambientes severos, se ha venido incrementando el interés por el uso de aleaciones Ni-Cr-Mo; por tanto, un adecuado proceso de soldadura es de gran relevancia para obtener los resultados esperados, teniendo en cuenta la labor que va a desempeñar la pieza o estructura a soldar y las variables más destacadas de operación para seleccionar el método de soldadura más apropiado (Henderson et al, 2004; Messler, 2004). Los procesos de soldadura realizados en estas aleaciones dependen del mecanismo de refuerzo implementado para soportar elevadas temperaturas (Akande et al, 2021).

Posterior a la aplicación de un proceso de soldadura en las aleaciones Hastelloy, se pueden presentar diferentes defectos según el procedimiento realizado y las condiciones en las que se llevó a cabo, deteriorando las propiedades mecánicas de la pieza o equipo y poniendo en riesgo su correcto funcionamiento que puede terminar en un posible accidente. Algunas de las fallas que pueden aparecer son microfisuras, agrietamientos o la presencia de fases indeseadas (Wang et al., 2019).

Teniendo en cuenta lo anterior, en el presente proyecto se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica con base a los estudios realizados entre los años 2000-2021 sobre los efectos producidos en la microestructura y las propiedades mecánicas en aleaciones Ni-Cr-Mo por medio de distintos procesos de soldadura. Se investigó acerca de las aleaciones Hastelloy que se utilizarán como referentes para analizar, profundizar sobre los procesos de soldadura más empleados en estas aleaciones, su efecto en la formación de distintas fases o precipitados durante el procedimiento e identificar los cambios en las propiedades mecánicas en relación a la microestructura obtenida.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Determinar por medio de una revisión bibliográfica detallada de la literatura los efectos generados por los diferentes procesos de soldadura sobre la microestructura y las propiedades mecánicas en aleaciones Ni-Cr-Mo.

1.2 Objetivos Específicos

Identificar los tipos de soldadura empleados en diferentes campos industriales donde se utilicen aleaciones Ni-Cr-Mo.

Establecer los cambios microestructurales generados en las aleaciones Ni-Cr-Mo durante la aplicación de los procesos de soldadura.

Evaluar la influencia de los cambios microestructurales post-soldadura en las propiedades mecánicas de aleaciones Ni-Cr-Mo.

2. Aleaciones Ni – Cr – Mo

Cuando se requiere que una pieza o estructura presente un alto desempeño en entornos severos como ambientes corrosivos o expuestos a elevadas temperaturas, la mayoría de metales pierden sus principales características y no logran cumplir con los estándares esperados a causa de un notable deterioro en sus propiedades, lo que conlleva a que fallen de manera prematura; por lo tanto, es requerimiento del material que pueda mantener su integridad según las condiciones establecidas como lo hacen las aleaciones base níquel que reciben su nombre por tener más del 50% de este elemento en su composición química (Jangali et al., 2021).

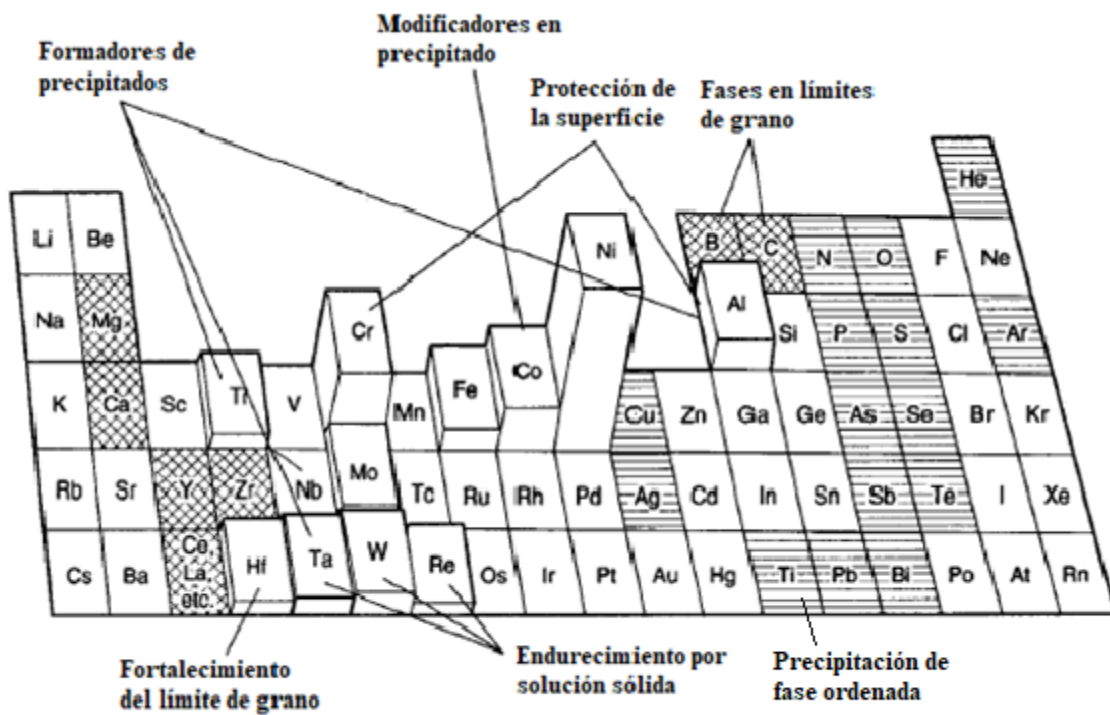
El níquel es un elemento que cuenta con numerosas propiedades que persuadieron a múltiples industrias de implementarlo en una gran variedad de aplicaciones, además de ser el menos atacado por entornos ácidos, alcalinos, productos químicos o por aceites y gases (Tamil et al, 2020). Si bien es un metal más costoso que el hierro, el níquel proporciona una mayor tenacidad y capacidad de conformado plástico que otros materiales del mismo nivel de resistencia mecánica. Se implementó por primera vez como elemento aleante en los aceros a mediados del siglo XVIII con el objetivo de mejorar la calidad y resistencia a la corrosión (Howard, 1963).

Con el transcurso del tiempo, se han desarrollado una gran cantidad de aleaciones base níquel según la función requerida y las condiciones a las que pueden estar sometidas; lo anterior se debe a que el níquel puede disolver altas concentraciones de otros elementos de aleación y no es propenso a corrosión bajo tensión como es el caso de los aceros inoxidable (Kiser et al, 2009). Al adicionar cromo o aluminio en las aleaciones base níquel, se proporciona una mejor resistencia a la corrosión generalizada y localizada por la formación de una capa de óxido protectora (Cr_2O_3 o Al_2O_3 según el elemento adicionado) que hace útil este tipo de aleaciones en diferentes aplicaciones que involucren corrosión, oxidación y/o sulfuración. Por otra parte, con la adición de titanio, se

genera una precipitación de la fase ordenada γ' - Ni₃Ti, que incrementa la resistencia a altas temperaturas (Kiser et al, 2009). En la figura 1 se puede ver la utilidad que tiene cada uno de los elementos de aleación mayoritarios y minoritarios en las aleaciones base níquel.

Figura 1

Efecto de los elementos de aleación mayoritarios y minoritarios en las aleaciones base níquel



Nota: Adaptado de Donachie, (2002).

Debido a la relativa facilidad del níquel para formar sistemas de aleación con elementos como cromo, molibdeno, hierro y cobre, se han desarrollado gran variedad de aleaciones resistentes a la corrosión y altas temperaturas para diversos entornos agresivos como es el caso de las aleaciones Ni-Cr-Mo, que también son conocidas como superaleaciones. Estas son muy aplicadas en la industria aeronáutica, aeroespacial, química, petroquímica, plantas de generación eléctrica y

nuclear (Yonezawa, 2012). En esta última área se han venido realizando muchas investigaciones con estas aleaciones por sus propiedades físicas, químicas y resistencia a la radiación emitida por algunos elementos, siendo implementadas por primera vez en el año 1950 cuando fueron utilizadas en reactores de agua a presión (PWR) y reactores de agua en ebullición (BWR). (Liu et al, 2021 ; Danon et al, 2020).

Las superaleaciones son mezclas homogéneas con base en elementos como cobalto, hierro o níquel y adición de distintos elementos de aleación para incrementar sus variadas propiedades. La principal característica de estas aleaciones es su combinación de alta resistencia mecánica con una alta resistencia a elevadas temperaturas; por ende, se han implementado con éxito en la fabricación de componentes para cohetes, reactores nucleares, hornos industriales, equipos petroquímicos, intercambiadores de calor, entre otros (Geddes et al, 2010).

Las necesidades actuales de muchas empresas en diversas áreas por utilizar materiales capaces de trabajar adecuadamente en ambientes severos, han impulsado la investigación e inversión en superaleaciones de alta calidad, que tienen un costo aproximado de 30 a 200 veces más que la de un acero inoxidable simple por su complicado proceso de obtención para comercializar; sin embargo, existe una amplia gama de dichos metales según la aplicación que va a desempeñar (Geddes et al, 2010). A pesar de que existen materiales aptos para las condiciones previamente descritas, las superaleaciones resultan ser mejores (Geddes et al, 2010).

El estudio de las aleaciones Ni-Cr-Mo comenzó en la década del 30, pero fue hasta la segunda guerra mundial en donde la necesidad de la época daría pie a la creación de nuevas aleaciones (Giampaolo, 2009). En 1950 se desarrolló la Waspaloy por las compañías estadounidenses Pratt Whitney y General Electric para los alabes de un motor de avión, siendo esta la primera superaleación base níquel. Posteriormente, se fueron fabricando otras aleaciones como la Hastelloy, René, Inconel, Incoloy, entre otras.

Las superaleaciones base níquel son denominadas materiales avanzados debido a su calidad en la resistencia a la fluencia, alta dureza, tenacidad y durabilidad. Son metales muy rígidos¹ con buena resistencia a la oxidación (sea agua de mar o aire) por sus elementos de aleación, tales como el hierro, molibdeno y cobre (Hosford, 2010); están compuestos por dos fases cristalinas principales que son γ y γ' , que presentan un adecuado comportamiento hasta aproximadamente los 1000°C, ya que la exposición prolongada a temperaturas más elevadas de la indicada pueden formar una amplia cantidad de fases secundarias (como σ y μ) con morfología laminar que provocan la fragilización del material (Tin et al, 2010 ;Kiser et al, 2009; Reed, 2006).

Gracias a la estructura cristalina cúbica centrada en las caras (FCC) del níquel, se facilita la difusión de elementos como aluminio, titanio y cromo para mejorar las propiedades del metal con el fin de resistir condiciones extremas de trabajo. Por lo anterior, estas aleaciones son ideales para piezas fijas o pivotes por su capacidad de soportar esfuerzos en dichas condiciones y que las hacen más ligeras en comparación a las elaboradas con materiales convencionales (Reed, 2006).

En los últimos años se han presentado varios avances respecto al desarrollo de modernos motores aeronáuticos y perfeccionamiento en las funciones de distintas piezas de los aviones, ya que las superaleaciones base níquel componen aproximadamente un tercio del material necesario para su elaboración. A causa de la gran cantidad de elementos de aleación, generan una combinación de propiedades adecuadas para mantener la integridad de la pieza en ambientes corrosivos y aumentan la resistencia a la oxidación, a las vibraciones y a la termofluencia hasta temperaturas de 1000 °C. Así mismo, son aleaciones muy implementadas en la área aeroespacial (Reed, 2006; Tin et al, 2010). También son muy importantes en la fabricación de turbinas de gas industriales (IGT) porque satisfacen las necesidades de los componentes expuestos al gas caliente

¹ La rigidez es la resistencia de un material a doblarse debido a la acción de fuerzas externas (Hosford, 2010)

y que están sometidos a condiciones de operación severas donde se requiere resistencia a la tracción, a la oxidación y ductilidad para poder soportar las cargas impuestas (Jangali et al., 2021).

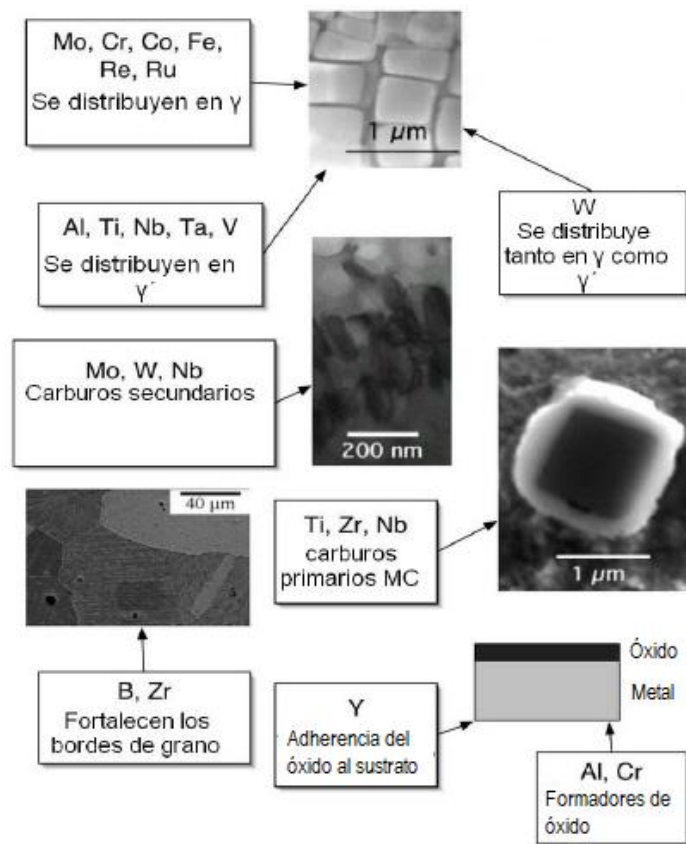
Estas aleaciones comercialmente contienen, además de níquel, elementos como aluminio o titanio (hasta 8%), cromo para la resistencia a la oxidación (10 a 20%), pequeñas cantidades de boro, carbono, circonio y otras adiciones como molibdeno, wolframio, tantalio, hafnio o niobio. Según la aplicación que van a ejercer, las superaleaciones pueden ser endurecidas por solución sólida (para una resistencia a altas temperaturas moderada²) o por precipitación (para condiciones más exigentes) (Tin et al, 2010). En la figura 2 se pueden identificar las funciones que cumplen cada uno de los elementos de aleación en la microestructura de las superaleaciones base níquel.

Actualmente, las aleaciones Hastelloy son muy estudiadas por su excelente comportamiento en condiciones estrictas de operación y excepcional resistencia a todo tipo de corrosión con respecto a muchos otros materiales. Las Hastelloy son un grupo de aleaciones cuyos principales elementos de aleación son el níquel, cromo y molibdeno. Fueron desarrolladas para tener una mayor resistencia a la corrosión de ácidos fuertes (principalmente ácido clorhídrico), ácidos minerales, soluciones de hipoclorito, dióxido de cloro, entre otras sustancias y también para aumentar la resistencia a altas temperaturas (logrando soportar temperaturas superiores a los 1000 °C) y mantener las propiedades características de una superaleación, siendo consideradas una de las más tenaces y resistentes del mundo (Ray et al, 2020).

² Una resistencia a altas temperaturas moderada significa que opera de manera adecuada entre 500 y 700 °C sin que sus propiedades físicas o químicas se vean afectadas (Kiser et al, 2009).

Figura 2

Efecto de los diferentes elementos de aleación en las superaleaciones base níquel



Nota: Adaptado de Bhadeshia, (2005).

Tomando en cuenta las características del párrafo anterior, las aleaciones Hastelloy son prioridad en unas aplicaciones comparadas con otras superaleaciones; un ejemplo es la Hastelloy N, que es considerada la principal opción para la elaboración de reactores de sales fundidas (MSR) porque son químicamente compatibles con las sales de fluoruro a diferencia de otras como las Incoloy. El impulso por obtener una mayor eficiencia, rendimiento y un menor costo en la producción de aleaciones Hastelloy, ha hecho que se promueva el estudio de estas para satisfacer las necesidades y que se logren soldar de manera adecuada sin perder la integridad del material

(Griffiths, 2019). En la tabla 1 se pueden apreciar algunas aleaciones Hastelloy con sus principales características y aplicaciones en las diferentes áreas que son requeridas. La tabla 2 muestra la composición química de las aleaciones antes vistas.

Tabla 1

Tipos de aleaciones Hastelloy con sus principales características y aplicaciones

Aleación	Características	Aplicaciones	Referencia
Hastelloy X	Excelente resistencia a: • Oxidación • Altas temperaturas (aproximadamente 1200°C) • Corrosión	Industria aeronáutica y petroquímica, hornos industriales y motores de turbinas de gas	(Sathishkumar et al, 2019) (Zhang et al., 2021)
Hastelloy C 276	Resistente a: • Corrosión general y localizada (pitting) • Medios oxidantes • Altas temperaturas	Industria nuclear, equipos de procesamiento químico y de alimentos.	(Qiu et al., 2020) (Ahmad et al., 2005)
Hastelloy N	Excelente resistencia a: • Corrosión • Oxidación • Ambientes altamente corrosivos de sales fundidas	Buen material estructural, Principalmente utilizado para la fabricación de reactores de sales fundidas.	(Wang et al., 2019) (Zhu et al., 2021)
Hastelloy C4	Excelente estabilidad a altas temperaturas y resistencia a la corrosión general, localizada y a fisuras por corrosión bajo tensión.	Equipos para procesamiento de químicos o recipientes para almacenarlos.	(Cieslak et al., 1986) (Huerta & Siefert, 2005)

Hastelloy C22	Resistente a: • Corrosión intergranular, picadura y fisuras por corrosión bajo tensión • Agrietamiento por solidificación	Equipos para plantas de decapado o para tubos de transporte de vapor.	(Gallagher et al, 2011) (El-Dasher et al., 2006)
Hastelloy B	Excelente resistencia a: • Altas temperaturas • Corrosión, especialmente a la oxidación	Utilizado en álabes de turbinas, cadenas transportadoras o recipientes a presión.	(Slaughter et al., 1959) (Maurer et al., 2010)
Hastelloy XR	Mejor resistencia a la corrosión y altas temperaturas en comparación con la Hastelloy X	Es utilizado como un material estructural en diferentes tipos de reactores.	(Watanabe et al., 1991) (Tanabe et al., 1997) (Sakaba et al., 2006)

Tabla 2

Composición química de los diferentes tipos de aleaciones Hastelloy presentadas en la tabla 1

Aleación	Composición química (%)										Referencia
	Ni	Cr	Mo	Fe	Si	C	Al	Mn	W	Cu	
Hastelloy X	Balanceado	22.3	9.16	18.2	0.26	0.054	-	0.247	0.2	-	(Sathishkumar et al, 2019)
Hastelloy N	Balanceado	6.96	16.3	3.88	0.33	0.061	0.08	0.52	-	-	(Wang et al., 2018)
Hastelloy C 276	56.07	16.3	15.1	6.08	0.03	0.01	-	0.35	4.15	0.28	(Bal et al., 2019)
Hastelloy C 4	67.2	15.7	15.1	0.45	0.03	0.004	-	0.17	0.1	-	(Cieslak et al., 1986)
Hastelloy C 22	55.29	21.3	13.4	3.65	0	0.003	-	0.23	2.93	0.06	(El-Dasher et al., 2006)
Hastelloy B	Balanceado	0.62	26.6	0.68	0.61	0.03	-	0.68	-	-	(Slaughter et al., 1959)
Hastelloy XR	Balanceado	21.6	9.06	18	0.33	0.06	-	0.89	0.49	-	(Tanabe et al., 1997)

3. Procesos de soldadura empleados en las aleaciones Ni – Cr – Mo

La soldadura es un proceso donde se genera la coalescencia de materiales calentándolos hasta determinada temperatura (ASTM International, 2010). Este proceso es de vital importancia en la fabricación de diferentes productos, teniendo una relación directa o indirecta con su producción, calidad y reparación (Messler, 2004). Por motivos del creciente desarrollo de las industrias en los diversos sectores respecto al funcionamiento de los equipos en ambientes agresivos como exposición a altas temperaturas por largo tiempo o estar en contacto con sustancias altamente corrosivas, se ha incrementado el interés por el uso de aleaciones Ni-Cr-Mo; debido a esto, un correcto proceso de soldadura es de gran relevancia para obtener los resultados deseados. Por otra parte, es importante realizar una evaluación rigurosa de qué procedimiento de soldadura es más recomendable según el entorno industrial estipulado (Tamil et al., 2020) y la formación de los operarios para ejecutar de manera eficiente el método de soldadura requerido (Smith et al, 2005).

Los tipos de soldadura en las aleaciones Ni-Cr-Mo varían según la aplicación solicitada, ya que la mayor dificultad se presenta en la resistencia a altas temperaturas que tienen dichos materiales debido a que los procesos de soldadura deben superar estas altas temperaturas para lograr su objetivo. Por lo anterior, los tipos de soldadura realizados en estas aleaciones dependen del mecanismo de refuerzo producido para soportar estas temperaturas, es decir, si se realizó por solución sólida o por precipitación. El tipo de soldadura más implementado en las superaleaciones Hastelloy son las soldaduras por arco eléctrico, que son un grupo de procesos que ocasionan la unión del metal (o metales según el caso) por medio de un arco, siendo este una descarga eléctrica controlada entre un electrodo y la pieza que se está trabajando (Donachie, 2002).

Los procesos de soldadura por arco más utilizados y estudiados en los últimos veinte años para las aleaciones Hastelloy son: soldadura por arco eléctrico con electrodo de tungsteno y protección gaseosa (GTAW), soldadura por haz de electrones (EBW), soldadura láser y soldadura por plasma (PAW). Los procesos anteriormente mencionados proporcionan una distorsión mínima en la pieza y un mejor control en los posibles defectos (Henderson et al, 2004). En la tabla 3 se pueden ver los procesos de soldadura que se utilizan en los distintos tipos de aleaciones Hastelloy.

Tabla 3

Procesos de soldadura por arco implementados en los diferentes tipos de aleaciones Hastelloy

Aleación	Procesos de soldadura				Referencias
	GTAW	EBW	Láser	Plasma	
Hastelloy X	X	X	X	X	(Sathishkumar et al, 2019) (Sahoo & Tripathy, 2020) (Sathishkumar et al., 2019)
Hastelloy C 276	X	X	X		(Cieslak et al., 1986) (Ahmad et al., 2005)
Hastelloy N	X				(Wang et al., 2018) (Wang et al., 2019)
Hastelloy C4	X			X	(Cieslak et al., 1986) (Huerta & Siefert, 2005)
Hastelloy C22	X				(Cieslak et al., 1986) (Gallagher et al, 2011)
Hastelloy B	X				(Slaughter et al., 1959)
Hastelloy XR	X				(Watanabe et al., 1991) (Tanabe et al., 1997)

3.1 Soldadura por arco eléctrico con electrodo de tungsteno y protección gaseosa

La soldadura GTAW, también conocida como proceso TIG (tungsten inert gas), es muy utilizada para la producción y reparación de aerogeneradores, cámaras de combustión y

componentes estructurales expuestos a altas temperaturas. Es un proceso de soldadura rentable, con gran importancia en la industria de las turbinas de gas por su alta concentración de calor y su atmósfera protectora con el gas inerte, minimizando la distorsión en la zona afectada por el calor y protegiendo el electrodo de tungsteno junto al metal fundido de la oxidación (Ghasemi et al., 2020).

Cuando se requiere la implementación de un metal de aporte se utilizan aleaciones dúctiles para minimizar el agrietamiento en caliente (Donachie, 2002). En algunos casos, para las aleaciones Hastelloy se emplea como material de aporte el alambre de relleno ERNiCrCoMo-1 con el fin de suprimir la segregación de carburos indeseados (Sathishkumar et al, 2019). El proceso GTAW fue desarrollado en 1941 y ha ido evolucionando a lo largo del tiempo, logrando soldar casi todas las aleaciones y siendo un método portátil que genera poca salpicadura e ideal para soldar aleaciones Hastelloy X (Xie et al, 2021; Smith et al, 2005).

3.2 Soldadura láser

La soldadura láser se aplica en la mayoría de casos con la técnica Nd-YAG³ debido a su gran capacidad de penetración ocasionada por su longitud de onda, que favorece la reducción de grietas en el momento de la solidificación (Sathishkumar et al, 2019). Hoy en día, se están realizando estudios con el objetivo de mejorar este método ya que según varias investigaciones con soldadura láser se podría disminuir la formación de fases frágiles y mantener la resistencia a la corrosión posterior al proceso de soldadura (Ma et al., 2013). Este procedimiento es empleado con frecuencia en la aleación Hastelloy C-276, que es usada para la producción de bombas centrifugas y piezas de válvulas en las industrias químicas y nucleares (Zhou et al., 2021).

³ La técnica láser Nd: YAG consiste en la emisión de una línea de infrarrojo cercano de 1064 nm. El cristal del cual se genera es de itrio y aluminio con adición de neodimio siendo uno de los tipos de láser más utilizados para los procesos industriales por su alta potencia (Sathishkumar et al, 2019).

Es un proceso ideal para la soldadura de metales disimiles por su flexibilidad operativa, gran rendimiento y mayor densidad de energía con menor aporte de calor, lo que evita la formación de granos gruesos que posteriormente derivarían en una mayor deformación plástica (Devendranath et al., 2014) (Zhou et al., 2021).

3.3 Soldadura por haz de electrones

La soldadura por haz de electrones (EBW) es uno de los procesos más populares y empleados en el campo espacial y aeroespacial por su tecnología acorde a las necesidades exigidas para realizar las reparaciones pertinentes de los equipos en el espacio. La soldadura por haz de electrones presenta muchas ventajas para operar en condiciones de vacío, garantizando la calidad en las juntas, eficiencia energética y máxima profundidad de penetración independiente del material y de las condiciones de la superficie. Un haz de electrones se puede enfocar con mucha precisión en lugares de difícil acceso, por lo que es un procedimiento adecuado para estructuras complejas (Liu et al., 2021).

Este procedimiento de soldadura proporciona una alta densidad energética, alta velocidad de soldadura, alta penetración, flexibilidad operativa, excelente acabado superficial y permite una fácil regulación de la entrada de calor para no afectar las propiedades del metal y así asegurar una extensión de la vida útil (Liu et al, 2021; Ahmad et al, 2005). La soldadura por haz de electrones es bastante utilizada para las aleaciones Hastelloy X (Donachie, 2002).

3.4 Soldadura por plasma

La soldadura por plasma (PAW) es un procedimiento de soldadura que implementa un haz de alta densidad de energía como fuente de calor para soldar, ocasionado por la ionización del medio al aumentar de manera repentina la temperatura (Liu et al., 2021). Es el procedimiento preferido para soldar aleaciones Hastelloy por su velocidad de soldadura, calidad y alta productividad. Adicionalmente, se genera una menor deformación del material por su arco estable

que produce una mayor concentración de energía. Este proceso es muy utilizado en las industrias aéreas, navales y automotrices (Sahoo & Tripathy, 2020).

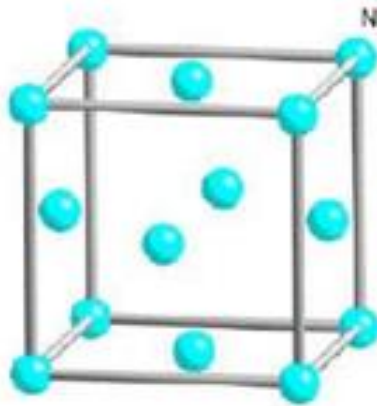
Según estudios recientes, el proceso por plasma está tomando mayor importancia en la actualidad por ser un procedimiento capaz de reparar superaleaciones difíciles de soldar, atribuido a su mayor penetración de soldadura, mejor control del arco, reducción de la tensión residual en la zona afectada por el calor y obtener una mejor calidad de soldadura de manera rápida y eficiente que otros métodos (Sahoo & Tripathy, 2020).

4.Cambios microestructurales de las aleaciones Ni-Cr-Mo post soldadura y su relación con las propiedades mecánicas

Las superaleaciones base níquel presentan una microestructura compuesta por una matriz FCC de níquel denominada austenita o gamma (γ), que contiene un gran porcentaje de elementos en solución sólida como el hierro, cromo, molibdeno, tungsteno, titanio y aluminio; además, estas aleaciones presentan una variedad de fases secundarias importantes como gamma prima (γ') y varios tipos de carburos como los primarios MC y los secundarios $M_{23}C_6$, entre otros (Oakey, 2011). En la figura 3 se observa la estructura cristalina de γ .

Figura 3

Estructura cristalina de la matriz gamma (γ)



Nota: Tomado de Bhadeshia, (2005).

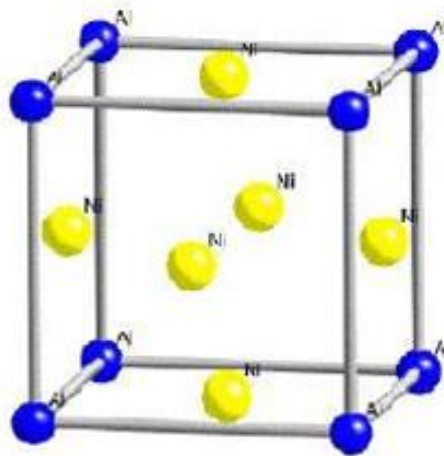
Los precipitados se pueden clasificar como fases geoméricamente compactas (GCP: geometrically close-packed phases), fases topológicamente compactas o carburos. Por lo general, las fases GCP son buenas para las propiedades mecánicas del metal, caso contrario a las fases topológicamente compactas. La principal GCP es la fase gamma prima (γ') que está formada por precipitados intermetálicos que proporcionan gran resistencia mecánica a las superaleaciones y se producen por un tratamiento térmico que causa la aparición de dichas partículas (Campbell, 2012). en la figura 4 se puede observar la estructura cristalina que presenta la fase gamma prima. La precipitación de γ' influye en la resistencia a la fluencia, debido a que obstaculiza el movimiento de las dislocaciones y por consiguiente producen un mayor volumen de estas. A mayor volumen se promueve una mejor resistencia por causar una fase compacta y de alta coherencia, es decir, que guarda una relación entre la fase generada y la matriz (Akande et al, 2021; Belan & Juraj,2016).

La fase γ' es homogénea y muy dúctil, es por ello que fortalece la matriz sin perder resistencia a la fractura. El precipitado más importante en las superaleaciones base níquel es el $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ según el elemento en mayor proporción, que junto a γ' mejoran la resistencia a altas

temperaturas. Es un compuesto tipo A_3B en donde A es un compuesto de elementos relativamente electronegativos (níquel) y B por elementos electropositivos (aluminio o titanio) (Campbell, 2012). En las aleaciones Hastelloy, el aluminio y titanio cumplen con la función de ser potentes endurecedores de solución sólida y reforzadores de precipitado en el envejecimiento (Campbell, 2012).

Figura 4

Estructura cristalina de la fase gamma prima (γ')



Nota: Tomado de Bhadeshia, (2005).

4.1 Procesos de endurecimiento en aleaciones Ni-Cr-Mo

Los procesos de refuerzo en las superaleaciones se pueden manipular según la propiedad mecánica que se desea modificar para determinada aplicación o la temperatura a la que va a operar, regulando los niveles de fortalecimiento y obteniendo un endurecimiento por solución sólida o por una fase de precipitado (envejecimiento) (Oakey, 2011). Para bajas temperaturas se refuerza por

medio de solución sólida a través de fases secundarias como γ' y carburos, mientras que para altas temperaturas se endurece por precipitación (Campbell, 2008; Akande et al., 2021).

El endurecimiento por solución o disolución sólida es un método que se basa en introducir átomos en forma de impurezas en los metales para que se disuelven como solución sólida sustitucional o intersticial, dificultando el movimiento de las dislocaciones y por lo tanto, endureciendo el material (Yonezawa, 2012). El endurecimiento por precipitación o envejecimiento térmico se basa en los cambios de solubilidad con la temperatura, generando que la composición de la fase inicial se transforme en un producto de dos fases metaestables, formando una barrera eficaz contra el movimiento de las dislocaciones. La precipitación de sólidos puede producir diferentes tamaños de partícula (Campbell, 2012).

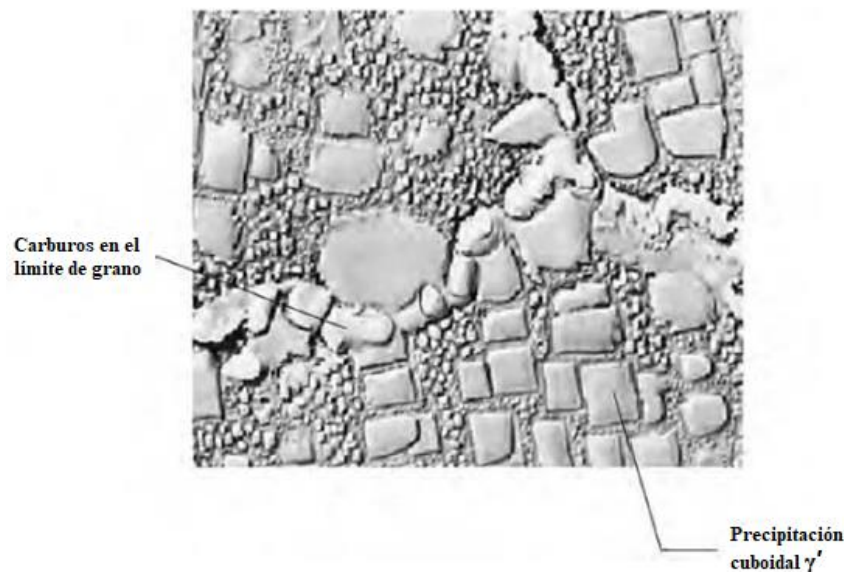
Existen dos requisitos para producir el endurecimiento por precipitación: el primero es que se debe obtener un precipitado bastante fino y disperso en la matriz, mientras el segundo es que debe haber una relación entre las partículas de la fase precipitada y la matriz, es decir, que sea coherente. La coherencia entre las fases γ y γ' se mantiene debido a la relación proporcional de orden del $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ con respecto a la temperatura; el desajuste entre las fases determinará la morfología del precipitado obtenido: si es menor del 0.05% se producirá un precipitado esférico mientras que uno mayor formará un precipitado cuboidal como se puede apreciar en la figura 5 (Campbell, 2012).

La microestructura de las aleaciones reforzadas presenta un conflicto entre resistencia y ductilidad por la fase dual que se forma, ya que presenta beneficios en el endurecimiento pero disminuye la ductilidad de la matriz (Xu et al., 2020). Los procesos de soldadura implementados para las aleaciones Ni-Cr-Mo dependen del mecanismo de refuerzo realizado para soportar las altas temperaturas, ya que una de las principales características de estos materiales es tolerar temperaturas superiores al 80% del punto de fusión inicial, teniendo un porcentaje bastante elevado

en comparación a otros materiales ingenieriles (Akande et al., 2021) La alta resistencia de las aleaciones base níquel endurecidas por precipitación se convierte en un obstáculo al momento de realizar el proceso de soldadura por arco eléctrico debido a que deben superar temperaturas de 1000 °C y tener una adecuada velocidad de avance para evitar la formación de grietas por solidificación (en el caso de usar los procesos laser o EBW) o grietas en caliente en la zona afectada por el calor. (Henderson et al, 2004)

Figura 5

Micrografía de un precipitado cuboidal posterior a un envejecimiento



Nota: Adaptado de Campbell, (2008).

Cuando las aleaciones Ni-Cr-Mo son expuestas a distintos rangos de temperaturas, suceden diferentes transformaciones de fase a considerar: A temperatura ambiente estas aleaciones conservan una microestructura de una sola fase FCC. Entre temperaturas de 300 a 650 °C, ocurre una reacción homogénea sin nucleación preferencial en el borde de grano con una transformación

de ordenamiento de largo alcance, que es cuando los átomos comienzan a formar patrones regulares y repetitivos semejantes a una red tridimensional (Rodríguez, 2008; Tawancy et al, 1983). A temperaturas entre 600 a 1100°C, se produce la precipitación de carburos e intermetálicos por una reacción heterogénea que, a diferencia de la reacción homogénea, se produce en las impurezas o precipitados ya existentes y al requerir menor energía superficial es más propenso este tipo de reacciones. La cinética de precipitación de los carburos es más rápida que la de los intermetálicos (Bhadeshia, 2003).

4.2 Fallas mecánicas (agrietamientos) y fases indeseadas formadas durante los procesos de soldadura de aleaciones Ni-Cr-Mo

Durante la soldadura por haz de electrones (EBW) la concentración de hierro y cromo se reduce mientras que aumenta el tungsteno en la matriz, lo que produce que en estas zonas en el momento de la solidificación se generen partículas eutectoides que aumentan la fragilización del material. Lo anterior se debe a las bajas temperaturas de evaporación del hierro y cromo en comparación con otros elementos presentes (Ahmad et al., 2005). Durante el proceso, se debe tener cuidado con la precipitación de las fases topológicamente compactas como σ y μ que generan fisuras durante la solidificación (Sathishkumar et al, 2019). La soldadura láser mediante la técnica Nd: YAG también presenta una tendencia a la formación de grietas por solidificación a causa del rápido calentamiento y enfriamiento de la región (Sathishkumar et al., 2019; Wu et al., 2010).

El proceso de soldadura por plasma con el método keyhole (K-PAW) favorece el equilibrio microestructural de la aleación por su penetración adecuada a altas velocidades de desplazamiento gracias a sus elevados gradientes de temperatura y alta densidad de energía en el arco producido. Aun así, la alta entrada de calor promueve las grietas en caliente en la región de soldadura (Sharma et al., 2018; Ureña et al., 2007).

El proceso GTAW es un método rentable en relación a los anteriores y muy utilizado en la industria de las turbinas por su alta concentración de calor, aporte relativamente bajo en la entrada y atmósfera protectora de gas inerte que minimiza la contaminación y distorsión durante la soldadura (Wu et al., 2010). Sin embargo, la soldadura de aleaciones Hastelloy por este proceso es bastante compleja por el desarrollo de fases secundarias P y σ en las etapas finales de solidificación, proporcionando sitios para la nucleación de fisuras en caliente y generando una degradación en las propiedades metalúrgicas y mecánicas de la aleación (Sathishkumar et al, 2019).

La EBW y la soldadura por láser presentan una alta velocidad de avance en comparación al proceso GTAW que tiene un ritmo de soldadura mucho más limitado por la dificultad para deformar las aleaciones Hastelloy a altas temperaturas. Es importante tener en cuentas las respectivas medidas de seguridad durante la soldadura por láser y EBW por los efectos nocivos del haz de electrones o del mismo láser (Sathishkumar et al, 2019). Durante la EBW, soldadura láser y soldadura plasma pueden aparecer huecos o poros al finalizar el proceso que se atribuyen al agotamiento de cromo por la evaporación de este debido a la alta densidad de potencia utilizada durante los procedimientos (Sahoo & Tripathy, 2020).

Las técnicas de soldadura deben tener en cuenta la velocidad del procedimiento, ya que si la velocidad es muy alta la penetración será incompleta; por el contrario, si se presenta una baja velocidad se observarán mayor cantidad de grietas en caliente por la mayor entrada de calor además de un mayor desperdicio de energía. Por lo tanto, se requiere una velocidad de avance intermedia para proporcionar una mejor relación de aspecto - calidad en el la soldadura (Sathishkumar et al., 2019; Feng et al., 2018). Asimismo, se debe considerar la densidad de energía en los distintos procesos puesto que a menor densidad de energía mayor probabilidad de grietas en caliente en la zona de la soldadura (Benyounis et al., 2005).

La precipitación de carburos, fases secundarias en la zona de fusión, la segregación de elementos y el agrietamiento en caliente o por solidificación son problemas comunes que se encuentran al soldar por arco eléctrico las aleaciones Hastelloy (Sathishkumar et al, 2019).

La formación de grietas en la zona afectada por el calor (ZAT) es una de las preocupaciones más importantes en las industrias que utilizan estas aleaciones. El agrietamiento generalmente es intergranular y se asocia con la formación de una película líquida en los límites de grano de la ZAT durante la soldadura (Chaturvedi, 2020). La incapacidad de dicha película para adaptarse a las tensiones inducidas térmica y/o mecánicamente durante el enfriamiento da como resultado las microfisuras por medio de la descohesión a lo largo de una de las interfaces sólido-líquido en el límite de grano; lo anterior es conocido como agrietamiento por licuación o desgarro en caliente. Adicional, se pueden generar franjas de bajo punto de fusión que al fundirse forman películas en los límites de grano, que al estar sometidas a una alta temperatura por un largo tiempo forman fases eutécticas. El agrietamiento por licuación en la ZAT es un problema de mayor cautela, ya que los factores que contribuyen a su aparición a menudo están relacionados con la composición química del material y su microestructura, las cuales han sido mejoradas para obtener las propiedades deseadas según el entorno requerido (Chaturvedi, 2020; Wang et al., 2018).

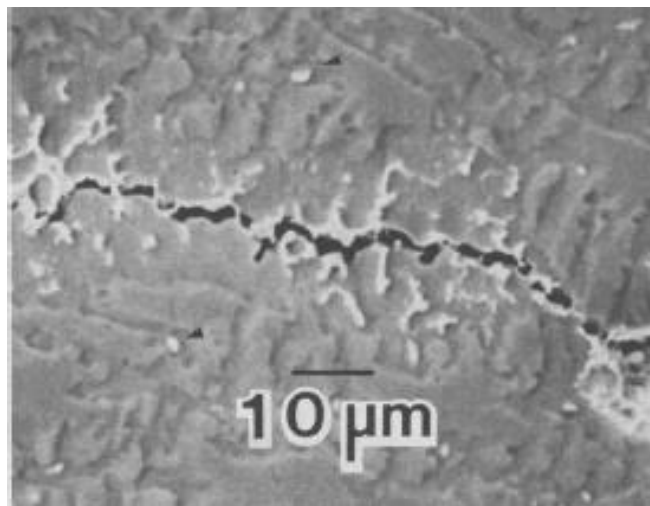
El agrietamiento en caliente ocurre en las áreas afectadas por la microsegregación. Cuando dichas áreas están solidificando, quedan expuestas a tensiones de contracción inherentes a los procesos de soldadura que forman posibles grietas; el agrietamiento por solidificación por lo general aparece a lo largo de la línea central de soldadura, por ser la última sección en solidificarse (Gallagher et al, 2011). En la figura 6 se puede observar la micrografía de una grieta en caliente en una aleación Hastelloy C-276.

Según Matsuda (1990), el mecanismo por el cual ocurre el agrietamiento en caliente es explicado con frecuencia por medio de la teoría generalizada modificada. Esta teoría indica que la

solidificación se subdivide en cuatro etapas, diferenciadas por rangos de temperatura descendiente: La etapa uno es conocida como la etapa blanda, que es cuando inicia la solidificación y hay demasiado líquido en la microestructura. La etapa dos se conoce como la etapa de coherencia y puede presentarse agrietamiento; sin embargo, aún hay demasiado líquido en la microestructura, por lo que cualquier grieta que llegara a formarse podría curarse. La etapa tres se llama etapa crítica, en esta se producen las grietas y ya no hay líquido residual que ayude a solucionarlas. Esta etapa se subdivide en la etapa de película y la etapa de gota, en la primera las grietas se generan y propagan mientras que en la segunda la grieta solo se puede propagar por las fisuras de la película. La última etapa es la de solidificación completa y a esta temperatura no se comienzan ni propagan grietas en caliente (Gallagher et al,2011).

Figura 6

Micrografía de un agrietamiento en caliente en una aleación Hastelloy C-276



Nota: Tomada de Cieslak, et al, (1986).

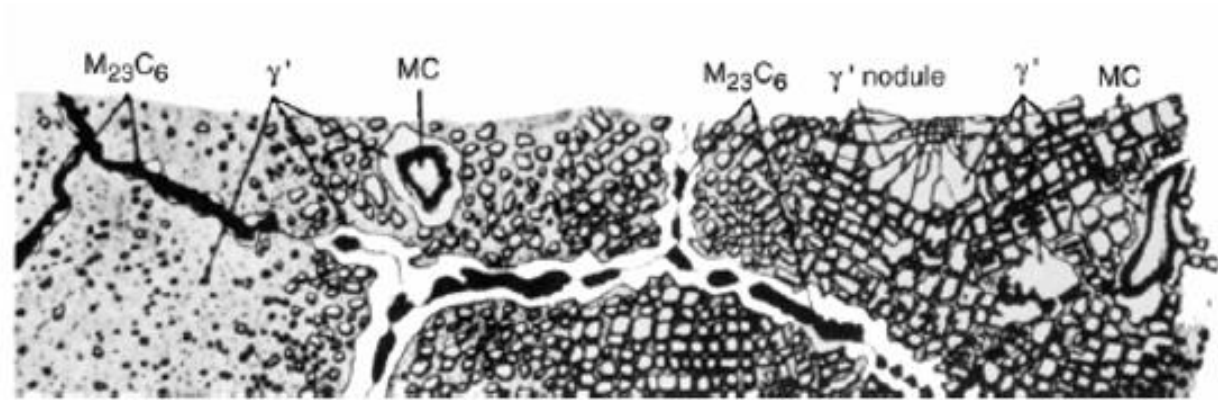
4.3 Carburos

La formación de los carburos es ocasionada por la mezcla entre el carbono añadido y los elementos reactivos y/o refractarios como titanio, tantalio, molibdeno o tungsteno. Los carburos se generan en los límites de grano durante los tratamientos térmicos o cuando la aleación está en servicio bajo ciertas condiciones. Los efectos de los carburos son beneficiosos para aumentar la resistencia a la ruptura a elevadas temperaturas pero pueden promover la formación de fases eutécticas que actúan como originadores de grietas en caliente y deteriorar las propiedades mecánicas del material a temperaturas superiores a los 1300°C (Wang et al., 2018). La letra M en la formula química de los carburos indica una mezcla de átomos metálicos (Sathishkumar et al, 2019; Yonezawa, 2012).

La precipitación de carburos depende del contenido de carbono y silicio de la aleación. La presencia de estos reduce la resistencia a la corrosión intergranular y bajo tensión (Streicher,1976); si la aleación posee un contenido mayor al 5% en peso de molibdeno, pueden aparecer carburos como el M_6C o $M_{12}C$ que son ricos en este elemento (Rodríguez, 2008). El estado inicial de los carburos es de grandes bloques de MC que posteriormente se descomponen durante el servicio o los tratamientos térmicos en $M_{23}C_6$ y M_6C . Frecuentemente, los carburos se forman por reacciones secuenciales en el sólido o por precipitación de las soluciones: Los $M_{23}C_6$ aparecen a temperaturas entre 760°C y 982°C (Krauss,2005). Los M_6C surgen en un rango de temperatura entre 815°C y 982°C, con una mayor presencia de molibdeno y tungsteno (Donachie, 2002). En la figura 7 se pueden ver los diferentes carburos presentes en una aleación Ni-Cr-Mo.

Figura 7

Presencia de carburos y fase γ' en la microestructura de superaleaciones base níquel

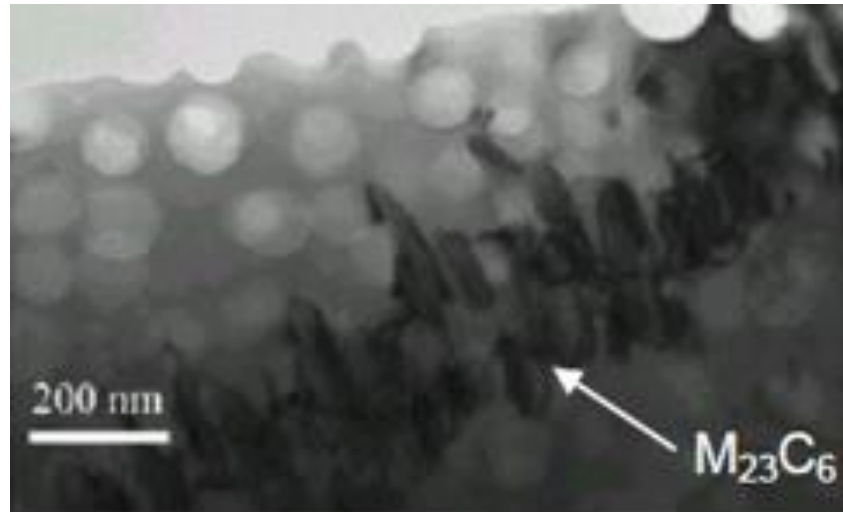


Nota: Adaptado de Donachie, (2002).

El carburo MC puede presentar una microestructura en bloque o globular; el $M_{23}C_6$ se encuentra naturalmente en los límites de grano de forma irregular o discontinua como se puede apreciar en la figura 8. El M_6C puede aparecer en bloques y cerca a los límites de grano como se puede ver en la figura 9.

Figura 8

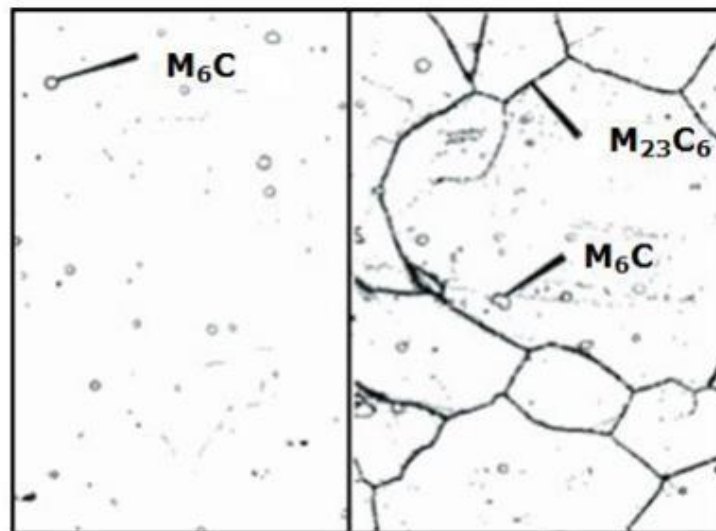
Micrografía de partículas de carburo $M_{23}C_6$ en el límite de grano desde la parte izquierda inferior a la derecha superior



Nota: Imagen de una microscopía electrónica de transmisión. Tomado de Bhadeshia, (2005).

Figura 9

Ejemplificación de la ubicación de los carburos M_6C y $M_{23}C_6$ en la microestructura de la aleación



Nota: Tomado de Krauss, (2005).

Los carburos M_6C y $M_{23}C_6$ (precipitados ricos en cromo) se pueden transformar fácilmente en fases eutécticas indeseables durante el proceso de soldadura (usualmente en el procedimiento GTAW) en la ZAT, que ocasionan la disminución de las propiedades mecánicas como la resistencia y ductilidad características del material (Wang et al., 2019; Sathishkumar et al, 2019). Los carburos ricos en molibdeno tienden a ubicarse en la zona de soldadura (WZ) y se pueden encontrar precipitados tipo MoC a temperaturas superiores a los $1300^{\circ}C$ (Wang et al., 2018). El mecanismo de formación de los carburos eutécticos M_6C es complicado, ya que según estudios previos, no se conoce con certeza si se da una transformación en el límite de grano o es una transformación de estado sólido (Wang et al., 2018) sin embargo, al ser el carburo más estable a altas temperaturas es el más importante comercialmente para controlar el tamaño de grano de las distintas aleaciones durante diversos procesos de fabricación (Donachie, 2002).

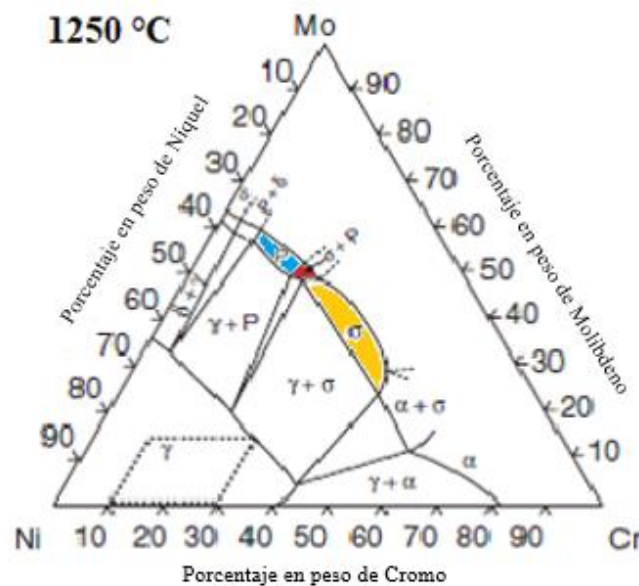
4.4 Fases topológicamente compactas

En las aleaciones Ni-Cr-Mo se ha informado la precipitación de diferentes intermetálicos denominados fases topológicamente compactas (TCP: Topologically o Tetrahedrally Closed Packed). Las más conocidas son las fases μ , σ , P y Laves (Cieslak et al., 1986 ; Rodríguez,2008). Las TCP son fases indeseables y generalmente frágiles que se pueden formar durante un tratamiento térmico o en servicio; son llamadas “topológicamente” porque las capas de átomos alineadas no se encuentran realmente compactas. Frecuentemente se presentan en forma de agujas, siendo perjudiciales para las propiedades mecánicas como la ductilidad y la resistencia a la fluencia (Bowman,2000). Adicional a las repercusiones anteriormente mencionadas, la creación de TCP agota los elementos de la matriz destinados a cumplir distintas funciones como la de reforzantes de solución sólida, mejorar la resistencia a la corrosión o las altas temperaturas (Wang et al., 2018).

La fase μ es un compuesto que tiene una estructura cristalina hexagonal compacta y posee características de fallas de apilamiento y maclas. En las aleaciones Ni-Cr-Mo, la fase P presenta una estructura ortorrómbica y se encuentra con frecuencia coexistiendo con la fase σ a altas temperaturas como se puede observar en el diagrama ternario Ni-Cr-Mo de la figura 10. La fase σ presenta una estructura cristalina tetragonal con un amplio rango de composiciones según la aleación en la que se encuentre, siendo esta la más nociva de todas (Cieslak et al., 1986; Rodríguez, 2008).

Figura 10

Diagrama ternario del sistema Ni-Cr-Mo a 1250°C



Nota: En la imagen se pueden observar señaladas: La fase P (azul), la fase σ (naranja) y la zona de coexistencia entre ambas fases (rojo). Adaptado de Kiser et al, (2009).

La formación de precipitados intermetálicos como las fases μ y P comienza en los bordes de grano a temperaturas superiores a los 600°C. La presencia de estas fases es desfavorable para el

metal por su fragilidad, que aumenta la sensibilidad de este al calor, agrietándose y disminuyendo la calidad de las uniones soldadas (Carranza,2001; Rebak,1999).

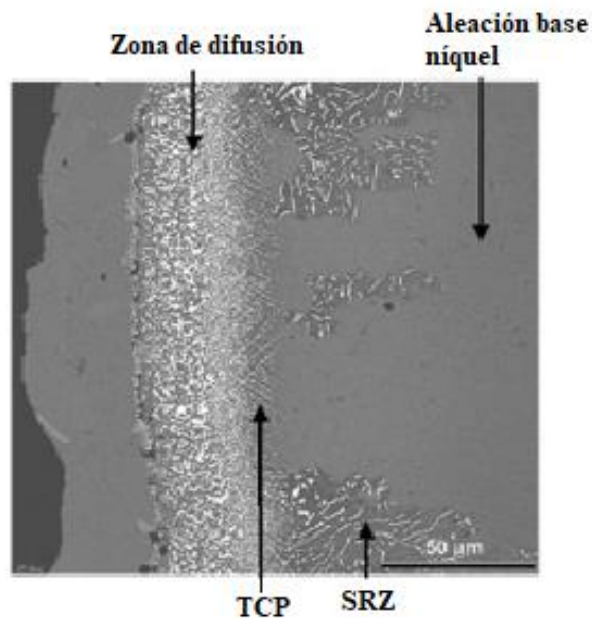
4.5 Zonas de reacción secundaria

Para restringir la formación de TCP se han venido limitando las concentraciones de los elementos agregados e incrementando la adición de rutenio en revestimientos de barrera térmica (TBC) aplicados en superficies metálicas que operan a temperaturas elevadas, con el objetivo de liberar calor y reducir la temperatura de servicio para soportar las cargas y al mismo tiempo proporcionar resistencia a la oxidación. Un TBC es una estructura multicapa compuesta por una capa superior cerámica, una capa de unión y una capa de óxido de crecimiento térmico (TGO) (Hong et al., 2013; Rae et al, 2001). No obstante, añadir rutenio puede producir la formación de una zona de reacción secundaria (SRZ) debajo del recubrimiento por la interdifusión entre la capa adhesiva y la superaleación al exponerse a altas temperaturas durante periodos de tiempo prolongados (Hong et al., 2013). En la Figura 11 se puede identificar la fase TCP en forma de agujas y la SRZ en una aleación base níquel.

La SRZ se define como una región compuesta de un sustrato con una alta densidad de fases finas de TCP (Hong et al., 2013). La formación del SRZ debajo del recubrimiento es indeseable ya que provoca el deterioro de las propiedades mecánicas y de fluencia por la gran cantidad de microgrietas que puede presentar y que conduce al desarrollo de grietas mayores (Bai et al., 2012). En la tabla 4 se presenta un resumen de los efectos causados por los distintos elementos en los precipitados que existen en las aleaciones Ni-Cr-Mo.

Figura 11

Micrografía de una aleación base níquel donde se pueden identificar la fase TCP y la SRZ



Nota: Tomado de Bhadeshia, (2005).

Tabla 4

Resumen general de los efectos de distintos elementos en la estabilidad de fases y precipitados en las superaleaciones base níquel

Efecto	Elementos	Propiedades mecánicas	Referencia
Fortalecedores de solución sólida	Co, Cr, Fe, Mo, W, Ta	Resistencia mecánica	(Kiser et al, 2009)
Fase ordenada γ' -Ni ₃ (Al, Ti)	Al, Ti	Resistencia a altas temperaturas	(Kiser et al, 2009)
Fortalecedores de solución sólida de γ'	Cr, Mo, Ti, Si	En altas temperaturas mejor resistencia a la tensión, mientras que a bajas temperaturas una mejor resistencia a la fatiga	(Campbell, 2012)(Kiser et al, 2009)(Akande et al., 2021)

TCP (μ , σ , P, Laves)	Ti, Ta, Nb, Al, Si	Fases indeseables que deterioran la resistencia a la tracción, dureza y fragiliza el metal a altas temperaturas	(Cieslak et al., 1986)
Formador de óxido superficial	Cr, Al	Resistencia a la corrosión	(Akande et al., 2021)
Formadores de carburos:			
MC	W, Ta, Ti, Mo	Aumentan la resistencia a la ruptura a altas temperaturas, pero también pueden ser generadores de fisuras en caliente, reducir la resistencia a la fluencia y la dureza	(Sathishkumar et al., 2019) (Yonezawa, 2012) (Oakey, 2011)
M ₂₃ C ₆	Cr, Mo, W		
M ₆ C	Mo, W		

Nota: Adaptado de Kiser et al, (2009).

4.6 Actualidad ante la problemática de las fallas mecánicas y fases indeseadas

Ahora bien, pese a los inconvenientes previamente descritos en las aleaciones Ni-Cr-Mo (aleaciones Hastelloy) durante y post soldadura, las empresas están tomando las respectivas medidas temporales para enfrentar estas dificultades mientras se encuentran soluciones más adecuadas. Para eliminar las TCP en la microestructura solidificada, se procede a realizar un recocido a temperaturas superiores a los 1100°C (El-Dasher et al., 2006). Con respecto al exceso de carburos, se debe limitar la cantidad de elementos reactivos y/o refractarios con el fin de evitar una abundancia innecesaria de estos. En la actualidad, la formación de grietas en caliente de las aleaciones Hastelloy se puede solucionar seleccionando los parámetros óptimos para el tipo de soldadura a implementar o utilizando métodos con mayor densidad de energía cuando sea de utilidad (Sathishkumar et al., 2019; Feng et al., 2018). En consecuencia, la selección de una técnica

de soldadura adecuada y un ajuste de variables idóneo puede reducir la formación de dichas grietas (Benyounis et al., 2005).

En la EBW, se pueden presentar poros ocasionados por el calor suministrado durante el proceso y microfisuras generadas por la velocidad de soldadura y/o potencia en el haz de electrones. Con una apropiada proporción de calor se puede controlar la aparición de porosidades y microfisuras durante este proceso (Sathishkumar et al., 2019).

Para la soldadura láser, una de las alternativas implementadas en los últimos años para evitar la formación de TCP ha sido introducir una vibración ultrasónica para suprimir la segregación de elementos que ayuden a formarlas (Sathishkumar et al., 2019). Un parámetro fundamental en este proceso es la energía del pulso, ya que influye en la microestructura del material y posteriormente en sus propiedades mecánicas tales como: resistencia a la tracción, elongación y dureza (Zhou et al., 2021). Empleando una mayor duración, frecuencia y energía del pulso laser, disminuyen las grietas por licuación; la reducción del estrés térmico y la velocidad de enfriamiento ayudan a prevenir las grietas en caliente (Sahoo & Tripathy, 2020).

En la soldadura GTAW, se realiza un tratamiento térmico post soldadura (PWTH por sus siglas en inglés) con el objetivo de reducir las tensiones residuales, controlar la dureza y mejorar la resistencia mecánica del metal (Wang et al., 2019).

Muchas investigaciones se han concentrado en la optimización de la microestructura de las aleaciones Hastelloy para lograr cumplir con las propiedades requeridas, mejorar su funcionamiento y extender la vida útil de la maquinaria; por lo tanto, el conocimiento de las fases indeseables y tipos de grietas que se pueden generar en los distintos procesos de soldadura son de gran interés para proporcionar mejores medidas de prevención y solución con el fin de continuar potenciando las propiedades mecánicas de estas aleaciones (Fleischmann et al., 2015).

5. Conclusiones

Se determinó con base a la revisión bibliográfica realizada que los tipos de soldadura empleados en las aleaciones Ni-Cr-Mo depende de la aplicación que vayan a cumplir, la resistencia mecánica del metal y el mecanismo de refuerzo utilizado, ya que si es endurecida por precipitación se requiere de temperaturas más altas para poder realizar la soldadura. Por lo anterior, los procesos de soldadura más utilizados son los de arco eléctrico, en los que se destacan: La soldadura por arco con electrodo de tungsteno y protección gaseosa (GTAW), soldadura por haz de electrones (EBW), soldadura láser y soldadura por plasma (PAW). Los procesos anteriormente mencionados son utilizados en campos industriales como el aeroespacial, aeronáutico, químico, nuclear y petroquímico.

Se estableció que los cambios en la microestructura de las aleaciones Ni-Cr-Mo durante los procesos de soldadura también dependen del mecanismo de refuerzo para soportar altas temperaturas, debido a que los procedimientos por arco deben alcanzar temperaturas elevadas que causan la formación de precipitados de carburos o TCP. Los bloques de carburos MC se descomponen en $M_{23}C_6$ y M_6C , ya que a temperaturas entre 600°C y 1100°C se produce la precipitación de estos; mientras que a partir de los 600°C se forman compuestos intermetálicos en los bordes de grano como μ , σ o P que son TCP y propician el deterioro de las propiedades mecánicas e inician sitios de nucleación de fisuras en caliente o durante la solidificación.

Se identificó que la precipitación de carburos es beneficiosa para el material porque aumenta la resistencia a la ruptura a elevadas temperaturas. Sin embargo, posterior a los procesos de soldadura, estos carburos se transforman fácilmente en fases eutécticas indeseables que actúan como originadores de grietas en caliente e inician un detrimento en las propiedades mecánicas de las superaleaciones.

Referencias Bibliográficas

Ahmad, M., Akhter, J. I., Akhtar, M., Iqbal, M., Ahmed, E., & Choudhry, M. A. (2005).

Microstructure and hardness studies of the electron beam welded zone of Hastelloy C-276.

Journal of Alloys and Compounds, 390(1–2), 88–93.

<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.08.031>

Akande, I. G., Oluwole, O. O., Fayomi, O. S. I., & Odunlami, O. A. (2021). Overview of

mechanical, microstructural, oxidation properties and high-temperature applications of superalloys. *Materials Today: Proceedings*, 43, 2222–2231.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.523>

ASTM International. (2010). Standard Welding Terms and Definitions - Including Terms for Adhesive Bonding, Brazing, Soldering, Thermal Cutting, and Thermal Spraying. *ASTM International*, 1–49.

Bai, Z., Li, D., Peng, H., Wang, J., Guo, H., & Gong, S. (2012). Suppressing the formation of SRZ in a Ni-based single crystal superalloy by RuNiAl diffusion barrier. *Progress in Natural Science: Materials International*, 22(2), 146–152.

<https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2012.03.007>

Benyounis, K. Y., Olabi, A. G., & Hashmi, M. S. J. (2005). Effect of laser welding parameters on the heat input and weld-bead profile. *Journal of Materials Processing Technology*, 164–165, 978–985. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.060>

Cieslak, M. J., Headley, T. J., & Romig, A. D. (1986). The welding metallurgy of HASTELLOY alloys C-4, C-22, and C-276. *Metallurgical Transactions A*, 17(11), 2035–2047.

<https://doi.org/10.1007/BF02645001>

Danon, A. E., Muránsky, O., Karatchevtseva, I., Zhang, Z., Li, Z. J., Scales, N., Kruzic, J. J., &

- Edwards, L. (2020). Molten salt corrosion (FLiNaK) of a Ni–Mo–Cr alloy and its welds for application in energy-generation and energy-storage systems. *Corrosion Science*, 164(July 2019). <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108306>
- Devendranath Ramkumar, K., Joshi, V., Pandit, S., Agrawal, M., Kumar, O. S., Periwal, S., Manikandan, M., & Arivazhagan, N. (2014). Investigations on the microstructure and mechanical properties of multi-pass pulsed current gas tungsten arc weldments of Monel 400 and Hastelloy C276. *Materials and Design*, 64, 775–782. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.08.055>
- Donachie, M. J. (2002). *Superalloys - A technical Guide* (Second edi). ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.ttg2.t61120065>
- El-Dasher, B. S., Edgecumbe, T. S., & Torres, S. G. (2006). The effect of solution annealing on the microstructural behavior of alloy 22 welds. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 37(12), 1027–1038. <https://doi.org/10.1007/s11661-006-1022-x>
- Feng, Y., Zhou, J., Cai, J., Zhang, X., & Wu, C. (2018). A 3-D lattice Boltzmann analysis of weld pool dynamic behaviors in plasma arc welding. *Applied Thermal Engineering*, 139(May), 623–635. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.051>
- Fleischmann, E., Miller, M. K., Affeldt, E., & Glatzel, U. (2015). Quantitative experimental determination of the solid solution hardening potential of rhenium, tungsten and molybdenum in single-crystal nickel-based superalloys. *Acta Materialia*, 87, 350–356. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.12.011>
- Ghasemi, A., Kolagar, A. M., & Pouranvari, M. (2020). Microstructure-performance relationships in gas tungsten arc welded Hastelloy X nickel-based superalloy. *Materials Science and Engineering A*, 793(July), 139861. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139861>
- Griffiths, M. (2019). Ni-based alloys for reactor internals and steam generator applications. In

Structural Alloys for Nuclear Energy Applications. Elsevier Inc.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397046-6.00009-5>

Henderson M.B , Arrell D, Heobel M, Larsson R, M. G. (2004). Nickel-Based Superalloy Welding Practices for Industrial Gas Turbine Applications. *Science and Technology of Welding & Joining*, 9(1), 1–14. doi:10.1179/136217104225017099

Hong, H. U., Yoon, J. G., Choi, B. G., Kim, I. S., & Jo, C. Y. (2013). On the mechanism of secondary reaction zone formation in a coated nickel-based single-crystal superalloy containing ruthenium. *Scripta Materialia*, 69(1), 33–36.

<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2013.03.015>

Howard, W. (1963). Nickel: An Historical Review. *D. Van Nostrand Co. Inc.*

<https://doi.org/10.1002/maco.19640150229>

Jangali Satish, G., Gaitonde, V. N., & Kulkarni, V. N. (2021). Traditional and non-traditional machining of nickel-based superalloys: A brief review. *Materials Today: Proceedings*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.632>

Kiser Samuel D, Lippold John C, D. J. N. (2009). Welding Metallurgy and Weldability of Nickel - Base Alloys. In *Wiley*.

Liu, Q., Wang, Z., Liu, W., Yin, H., Tang, Z., & Qian, Y. (2021). Ni-Mo-Cr alloy corrosion in molten NaCl-KCl-MgCl₂ salt and vapour. *Corrosion Science*, 180(August 2020), 109183. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.109183>

Liu, X., Dong, Q., Wang, P., & Chen, H. (2021). Review of Electron Beam Welding Technology in Space Environment. *Optik*, 225(October 2020), 165720. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165720>

Messler, R. W. (2004). Joining of Materials and structures. In *Joining of Materials and Structures*. <https://doi.org/10.1016/b978-075067757-8/50006-3>

- Rae, C. M. F., & Reed, R. C. (2001). The precipitation of topologically close-packed phases in rhenium-containing superalloys. *Acta Materialia*, 49(19), 4113–4125.
[https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(01\)00265-8](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00265-8)
- Ray, S., & Gavin., T. (2020). *Chemical Engineering Design* (pp. 371–398).
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102599-4.00007-2>
- Reed, R. C. (2006). *The Superalloys fundamentals and applications* (First). Cambridge University press. <http://library1.nida.ac.th/termpaper6/sd/2554/19755.pdf>
- Sahoo, A., & Tripathy, S. (2020). Development in plasma arc welding process: A review. *Materials Today: Proceedings*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.562>
- Sathishkumar, M., & Manikandan, M. (2019). Preclusion of carbide precipitates in the Hastelloy X weldment using the current pulsing technique. *Journal of Manufacturing Processes*, 45(December 2018), 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.06.027>
- Sathishkumar, M., Manikandan, M., Subramani, P., Anbarasan, N., Jerome, S., & Arivazhagan, N. (2019). Effect of Welding Speed on Aspect Ratio of Hastelloy X Weldment by Keyhole Plasma Arc Welding (K-PAW). *Materials Today: Proceedings*, 22, 3297–3304.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.291>
- Sharma, S., Taiwade, R. V., Vashishtha, H., Mukherjee, S., & Tiwari, S. (2018). Consumable selection for pulsed current gas tungsten arc welded bimetallic joints between Super C-276 alloy and Ti -stabilized Grade 321. *Journal of Manufacturing Processes*, 32, 32–47.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.01.018>
- Smith Ricky; Keith Mobley R. (2005). Rules of Thumb for Maintenance and Reliability Engineers. *Founding Welding Production Eng J*. <https://doi.org/10.22486/iwj.v29i3.182655>
- Tamil Selvan, C. P., Dinaharan, I., Palanivel, R., & Kalaiselvan, K. (2020). Predicting the tensile strength and deducing the role of processing conditions of hot wire gas tungsten arc welded

- pure nickel tubes using an empirical relationship. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 188(July). <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104220>
- Tin, S. and Pollock, T., 2010. *Nickel-Based Superalloys for Blade Application: Production, Performance and Application*. <https://doi.org/10.1002/9780470686652.eae218>.
- Ureña, A., Otero, E., Utrilla, M. V., & Múnez, C. J. (2007). Weldability of a 2205 duplex stainless steel using plasma arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 182(1–3), 624–631. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.08.030>
- Wang, W., Jiang, L., Li, C., Leng, B., Ye, X. X., Liu, R., Chen, S., Yu, K., Li, Z., & Zhou, X. (2019). Effects of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of Hastelloy N superalloy welds. *Materials Today Communications*, 19(February), 230–237. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.02.004>
- Wang, W., Li, C., Jiang, L., Ye, X. X., Yu, K., Chen, S., Li, Z., & Zhou, X. (2018). Evolution of carbide precipitates in Hastelloy N joints during welding and post weld heat treatment. *Materials Characterization*, 135(April 2017), 311–316. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.11.045>
- Wu, S. J., Du, C. W., & Kuo, C. M. (2010). Comparison of the mechanical properties of hastelloy X material after welding by GTAW and Nd-YAG laser. *Materials Science Forum*, 638–642, 2499–2504. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.638-642.2499>
- Xie, J., Ma, Y., Wang, M., Li, H., Fang, N., & Liu, K. (2021). Interfacial characteristics and residual welding stress distribution of K4750 and Hastelloy X dissimilar superalloys joints. *Journal of Manufacturing Processes*, 67(April), 253–261. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.001>
- Xu, J., Gruber, H., Boyd, R., Jiang, S., Peng, R. L., & Moverare, J. J. (2020). On the strengthening and embrittlement mechanisms of an additively manufactured Nickel-base

- superalloy. *Materialia*, (March), 100657. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100657>
- Yonezawa, T. (2012). Nickel alloys: Properties and characteristics. In *Comprehensive Nuclear Materials* (Vol. 2). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-056033-5.00016-1>
- Zhou, S., Wang, B., Wu, D., Ma, G., Yang, G., & Wei, W. (2021). Effect of pulse energy on microstructure and properties of laser lap-welding Hastelloy C-276 and 304 stainless steel dissimilar metals. *Optics & Laser Technology*, (March). <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107236>
- Howard, W. (1963). Nickel: An Historical Review. D. Van Nostrand Co. Inc. <https://doi.org/10.1002/maco.19640150229>.
- Kiser Samuel D, Lippold John C, D. J. N. (2009). Welding Metallurgy and Weldability of Nickel - Base Alloys. In Wiley.
- Yonezawa, T. (2012). Nickel alloys: Properties and characteristics. In *Comprehensive Nuclear Materials* (Vol. 2). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-056033-5.00016-1>
- Wu, S. J., Du, C. W., & Kuo, C. M. (2010). Comparison of the mechanical properties of hastelloy X material after welding by GTAW and Nd-YAG laser. *Materials Science Forum*, 638–642, 2499–2504. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.638-642.2499>
- Smith Ricky; Keith Mobley R. (2005). Rules of Thumb for Maintenance and Reliability Engineers. *Founding Welding Production Eng J*. <https://doi.org/10.22486/iwj.v29i3.182655>
- Strang A Banks, Conroy W, G. R. D. (1997). Advances in Turbine Materials, Design and Manufacturing. *The Institute of Materials, Minerals and Mining*, 407–423.
- Singh, R. (2012). *Applied Welding Engineering : Processes , Codes and Standards Applied* (First). Elsevier.
- Chaturvedi, M., 2020. *Welding and joining of aerospace materials*. 2nd ed. Duxford: Woodhead Publishing.

- Tin, S., & Pollock, T. (2010). *Nickel-Based Superalloys for Blade Application: Production, Performance and Application*. Illinois Institute of Technology.
- Hosford, W. (2010). *Physical Metallurgy* (2nd ed.). CRC Press.
- Reed, R. C. (2006). *The Superalloys fundamentals and applications* (First). Cambridge University press. <http://library1.nida.ac.th/termpaper6/sd/2554/19755.pdf>
- Gallagher M.L, Lippold J. (2011) Weld Crackings Suceptibility of Alloy C-22 Weld – Metal. In: Böllinghaus T., Lippold J., Cross C. (eds) Hot Cracking Phenomena in Welds III. Springer. Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-16864-2_19
- Martín A. Rodríguez. (2008) Aleación C-22: una barrera resistente a la corrosión en contenedores de residuos nucleares de alta actividad. Tesis de Doctorado, Instituto Sabato, Universidad Nacional de San Martín, Argentina.
- Tawancy H. M, Herchenroeder R. B and Asphahani A. I. (1983) High-performance Ni-Cr-Mo-W alloys, *Journal of Metals*.
- Bhadeshia H.K.D.H. (2003) *Superalloys*, University of Cambridge. <http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2003/nickel.html>.
- Streicher M. A. (1976) Effect of composition and structure on crevice, intergranular, and stress corrosion of some wrought Ni-Cr-Mo alloys, *Corrosion* Vol. 32.
- Bowman Randy. (2000) *Superalloys: A primer and History*. As a supplement to the Minerals, metals & Materials Society's a site dedicated to the 9th international symposium on superalloys, <http://www.tms.org/meetings/specialty/superalloys2000/superalloyshistory.html>
- Carranza R.M, Rebak R.B. (2001). Efecto del envejecido a alta temperatura sobre la resistencia a la corrosión de la aleación 22. Jornadas SAM-CONAMET-AAS 2001.
- Rebak R. B. (1999), T. S. E. Summers and R. M. Carranza in Symposium Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXIII meeting of the Materials Research

- Society, November 29 - December 3, Boston, Massachusetts, Paper QQ14.4.
- Agarwal D.C (2004). Nickel and Nickel Alloys, in handbook of advanced materials: Enabling new design, chapter 7, USA.
- Asphahani A. I. (1989) Advances in the development of Ni-Cr-Mo-W alloy systems with improved resistance to aqueous corrosion. The Arabian Journal of Science and Engineering, Vol. 14, N°2.
- Kawagishi K. (2012) «Development of an oxidation resistant high-strength sixth-generation single-crystal superalloy TMS-238,» Superalloys.
- Giampaolo T. (2009). Gas Turbine Handbook: Principles and practice, 4 ed., Fairmont Press Inc.
- Krauss G. (2005), Steels Processing, Structure and Performance, ASM International.
- Matsuda F. (1990). Hot crack susceptibility of weld metal. Advances in Welding Metallurgy – 1st US – Japan Symposium.
- Belan, Juraj (2016). "Fases de GCP y TCP presentadas en superaleaciones a base de níquel". doi:10.1016 / j. matpr.2016.03.024.
- Battelle Memorial Institute. (2019). Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS-14) - 6.1.1.1 Mechanical Properties. Battelle Memorial Institute. <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt012100U5/metallic-materials-properties/heat-resis-mechanical>
- Campbell, F.C. (2008). Elements of Metallurgy and Engineering Alloys - 30. Superalloys. ASM International. <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00URM1Q1/elements-metallurgy-engineering/superalloys>
- Campbell, F.C. (2012). Phase Diagrams - Understanding the Basics - 16.1 Precipitation Hardening. ASM International.

<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00AEKEV4/phase-diagrams-understanding/nonequilibrium-precipitation-2>

Oakey, John E. (2011). Power Plant Life Management and Performance Improvement - 9.1 Introduction. Woodhead Publishing.

<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0092YAH1/power-plant-life-management/gas-turbin-introduction>

Chandler, Harry. (1996). Heat Treater's Guide - Practices and Procedures for Nonferrous Alloys - 3.5 Incoloy 901. ASM International.

<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt007HFIE6/heat-treaters-guide-practices-2/incoloy-901>

Morinaga, M. (2019). Nickel Alloys. *A Quantum Approach to Alloy Design*, 19–45. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814706-1.00003-0>

Schaschke, C. (2014). *Dictionary of Chemical Engineering*. Oxford University. Knovel <https://hotlink/dictionary-chemical-engineering/dictionary-chemical-engineering>

Katayama, S. (2013). *Handbook of Laser Welding Technologies*. Elsevier Inc. <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHLWT0001/handbook-laser-welding/handbook-laser-welding>.

Chen, Z., & Taheri, M. (2020). The effect of pre-heating and pre-cold treatment on the formation of liquation and solidification cracks of nickel-based superalloy welded by laser beam. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 11162–11177. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.053>

Bemani, M., & Pouranvari, M. (2020). Microstructure and mechanical properties of dissimilar nickel-based superalloys resistance spot welds. *Materials Science and Engineering A*, 773(October 2019), 138825. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138825>

- Zhou, S., Ma, G., Dongjiang, W., Chai, D., & Lei, M. (2018). Ultrasonic vibration assisted laser welding of nickel-based alloy and Austenite stainless steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 31, 759–767. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.12.023>
- Basuki, W. W., Kraft, O., & Aktaa, J. (2012). Optimization of solid-state diffusion bonding of Hastelloy C-22 for micro heat exchanger applications by coupling of experiments and simulations. *Materials Science and Engineering A*, 538, 340–348. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.01.056>
- Ji, S., Sun, X., Ma, Z., Gong, P., & Wen, Q. (2021). Friction stir diffusion welding realized by a novel tool with turbo-like pin. *Materials Science and Engineering A*, 800(October 2020), 140369. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140369>
- Geddes, B., Leon, H., & Huang, X. (2010). *Superalloys*. Materials Park, Ohio: ASM International.
- Bal, K. S., Dutta Majumdar, J., & Roy Choudhury, A. (2019). Effect of electron beam accelerating voltage on the melt zone area, secondary-dendrite arm spacing and fusion line microstructure of bead-on-plate welded Hastelloy C-276 sheet. *Optik*, 183(January), 355–366. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.02.084>
- Bal, K. S., Dutta Majumdar, J., & Roy Choudhury, A. (2019). Study of intergranular corrosion mechanism of fiber laser welded 3-mm-thick Hastelloy C-276 sheet. *Corrosion Science*, 157(June), 406–419. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.06.015>
- Feng, Y., Zhou, J., Cai, J., Zhang, X., & Wu, C. (2018). A 3-D lattice Boltzmann analysis of weld pool dynamic behaviors in plasma arc welding. *Applied Thermal Engineering*, 139(May), 623–635. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.051>
- Kim, J. D., Kang, K. H., & Kim, J. N. (2004). Nd : YAG laser cladding of marine propeller with hastelloy C-22. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 79(4–6), 1583–1585. <https://doi.org/10.1007/s00339-004-2854-0>

- Kurata, Y., & Nakajima, H. (1996). Creep properties of 20% cold-worked Hastelloy XR. *Journal of Nuclear Materials*, 228(2), 176–183. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(95\)00222-7](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(95)00222-7)
- Ma, G., Wu, D., Niu, F., & Zou, H. (2015). Microstructure evolution and mechanical property of pulsed laser welded Ni-based superalloy. *Optics and Lasers in Engineering*, 72, 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2015.03.009>
- Maurer, J. J., Mallett, J. J., Hudson, J. L., Fick, S. E., Moffat, T. P., & Shaw, G. A. (2010). Electrochemical micromachining of Hastelloy B-2 with ultrashort voltage pulses. *Electrochimica Acta*, 55(3), 952–958. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.09.004>
- Mulligan, C. P., Wei, R., Yang, G., Zheng, P., Deng, R., & Gall, D. (2015). Microstructure and age hardening of C276 alloy coatings. *Surface and Coatings Technology*, 270, 299–304. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.02.030>
- Pakniat, M., Ghaini, F. M., & Torkamany, M. J. (2016). Hot cracking in laser welding of Hastelloy X with pulsed Nd: YAG and continuous wave fiber lasers. *Materials and Design*, 106, 177–183. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.124>
- Pathak, U., Taiwade, R. V., & Balbande, S. (2020). Weldability of bimetallic butt joint between hastelloy C-276 and advance austenitic stainless steel. *Materials Today: Proceedings*, 28, 2547–2550. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.114>
- Perricone, M. J., DuPont, J. N., & Cieslak, M. J. (2003). Solidification of hastelloy alloys: An alternative interpretation. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 34 A(5), 1127–1132. <https://doi.org/10.1007/s11661-003-0132-y>
- Qiu, Z., Wu, B., Zhu, H., Wang, Z., Hellier, A., Ma, Y., Li, H., Muransky, O., & Wexler, D. (2020). Microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured Hastelloy C276 alloy. *Materials and Design*, 195, 109007. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109007>
- Rae, C. M. F., & Reed, R. C. (2001). The precipitation of topologically close-packed phases in

- rhenum-containing superalloys. *Acta Materialia*, 49(19), 4113–4125.
[https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(01\)00265-8](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00265-8)
- Reed, R. C., Cox, D. C., & Rae, C. M. F. (2007). Damage accumulation during creep deformation of a single crystal superalloy at 1150 °C. *Materials Science and Engineering A*, 448(1–2), 88–96. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.11.101>
- Saju, T., & Velu, M. (2020). Review on welding and fracture of nickel based superalloys. *Materials Today: Proceedings*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.334>
- Watanabe, K., Nakajima, H., Sahira, K., Kurauchi, N., Takeiri, T., Saitoh, T., Takatsu, T., & Nakanishi, T. (1991). Development of a filler metal for Hastelloy alloy XR weldment. *Journal of Nuclear Materials*, 185(1), 8–18. [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(91\)90360-J](https://doi.org/10.1016/0022-3115(91)90360-J)
- Zhang, F., Levine, L. E., Allen, A. J., Stoudt, M. R., Lindwall, G., Lass, E. A., Williams, M. E., Idell, Y., & Campbell, C. E. (2018). Effect of heat treatment on the microstructural evolution of a nickel-based superalloy additive-manufactured by laser powder bed fusion. *Acta Materialia*, 152, 200–214. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.03.017>
- Zhang, W., Zheng, Y., Liu, F., Wang, D., Liu, F., Huang, C., Li, Q., Lin, X., & Huang, W. (2021). Effect of solution temperature on the microstructure and mechanical properties of Hastelloy X superalloy fabricated by laser directed energy deposition. *Materials Science and Engineering*: (June). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141537>
- Zhu, D., Zhang, X., & Ding, H. (2013). Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.08.001>
- Zhu, H., Muránsky, O., Wei, T., Davis, J., Budzakoska-Testone, E., Huang, H., (2021). The effect of applied stress on the high-temperature creep behaviour and microstructure of NiMoCr Hastelloy-N® alloy. *Materialia*, (March) <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101069>.