

EFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

Efecto de los procesos de soldadura sobre las propiedades mecánicas de los aceros inoxidables

dúplex: Estado del arte

Anggie Julieth García Barajas, Daniela Tarazona Grajales

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniera metalúrgica

Director

Mauricio Rincón Ortiz

Doctor en Ciencia y Tecnología Mención Materiales

Codirectora

Ana María Pérez Ceballos

Doctora en Ingeniería

Universidad Industrial De Santander

Facultad De Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela De Ingeniería Metalúrgica Y Ciencia De Los Materiales

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

A Dios por la vida y su infinito amor.

A mis padres, Jaime y Ana, por ser mi gran ejemplo a seguir, por su gran esfuerzo y su apoyo incondicional en cada decisión que he tomado.

A mis hermanas, Jeimy y Jised por ser mis amigas, confidentes y cómplices de cada aventura.

A mis familiares, especialmente mis abuelos y mi tía Ruby, por creer en mí siempre.

Anggie Julieth García Barajas

EFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

Dedicatoria

Dedicado a mis padres por todo su apoyo, confianza, esfuerzo, dedicación y amor que me han brindado toda mi vida.

Dedicado a mis hermanas por acompañarme, aconsejarme y siempre estar ahí presentes en cada camino que he decidido tomar.

Dedicado a mis abuelos que me motivaron a creer en mí y me han apoyado en cada momento vivido.

Daniela Tarazona Grajales

EFFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

Agradecimientos

A mi compañera Daniela por su paciencia y dedicación, por compartir conmigo más allá de la realización de este proyecto, por su amistad incondicional.

A nuestros directores Mauricio Rincón Ortiz y Ana María Pérez Ceballos, por aconsejarnos y orientarnos durante la realización del proyecto, por apoyarnos dentro y fuera de clases.

A la Universidad Industrial de Santander por ser un segundo hogar a lo largo de los años.

A mis amigos de infancia, Giovany, Brayan, William y Pepe por estar junto a mí en cada etapa de mi vida, por todas las risas, películas y hamburguesas que hemos compartido.

A mis amigas de universidad, Maleja, Diana G y Gabriela por sus ocurrencias, malos chistes, fiestas y cenas disfrutadas, por estar sin importar el tiempo y la distancia.

Anggie Julieth García Barajas

EFFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por bendecirme toda mi vida universitaria, por darme la fuerza de afrontar las dificultades que fueron presentándose y por premiarme con la familia, amigos y profesores que hicieron parte a lo largo del camino.

Quiero expresar mis agradecimientos a nuestro director de tesis el Dr. Mauricio Rincón Ortiz y codirectora la Dr. Ana María Pérez Ceballos, por la dedicación, paciencia y dirección brindada en este proyecto. Gracias por el conocimiento impartido y por la confianza puesta en nosotras.

Asimismo, agradezco a mi amiga y compañera de proyecto Anggie García, por el tiempo concedido y por la amistad ofrecida. Gracias por el apoyo moral y especialmente, gracias por compartir conmigo la alegría de terminar este ciclo

Gracias a todos mis amigos por su apoyo académico y humano, especialmente a Alejandra, Maure y Juan Pablo con los que no solo compartí gratos momentos, si no también mis momentos más difíciles, gracias por siempre ayudarme a salir de cada uno de ellos. Gracias por todos estos años y por cada recuerdo que permanecerá siempre en mi memoria.

Pero, sobre todo, gracias a mi familia, por su paciencia, apoyo y amor, todo lo que me han brindado ha sido sumamente importante, gracias por ser parte de mi evolución y por creer en mí, sin ustedes no sería la persona que soy hoy. Gracias por los aportes invaluable que me servirán toda mi vida.

A todos, muchas gracias.

Daniela Tarazona Grajales

EFFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

Contenido

Introducción	11
1.Objetivos	13
1.1. Objetivo general.....	13
1.2. Objetivos específicos.....	13
2. Fundamentación teórica	14
2.1. Aceros inoxidables dúplex (DSS, por sus siglas en inglés)	14
2.2. Soldadura en aceros inoxidables dúplex (DSS, por sus siglas en inglés)	15
2.3. Efecto de los procesos de soldadura en la microestructura de aceros inoxidables dúplex (DSS).....	16
3. Metodología	19
4. Resultados	20
4.1. Soldadura en aceros inoxidables dúplex	20
4.1.1. Soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW, por sus siglas en inglés).....	21
4.1.2. Soldadura por arco con electrodo de tungsteno y gas de protección (GTAW, por sus siglas en inglés).....	22
4.1.3. Soldadura de arco con núcleo fundente (FCAW, por sus siglas en inglés)	23
4.1.4. Soldadura con láser (LBW, por sus siglas en inglés).....	24
4.1.5. Soldadura con arco de plasma (PAW, por sus siglas en inglés).....	25
4.1.6. Soldadura por Fricción-Agitación (FSW, por sus siglas en inglés).....	26
4.2. Microestructura de los aceros DSS soldados	27
4.3. Influencia de las fases no deseadas en los aceros DSS soldados	33
5. Conclusiones	38
Referencias.....	40

EFFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

Lista de tablas

Tabla 1. Composición química de diferentes aceros inoxidables dúplex	15
Tabla 2. Fases secundarias no deseadas comúnmente precipitadas en DSS	18
Tabla 3. Parámetros de soldadura para diferentes procesos y aceros DSS	28
Tabla 4. Micrografías de las fases secundarias no deseadas en los diferentes DSS	30
Tabla 5. Propiedades mecánicas de los aceros sometidos a diferentes procesos de soldadura ...	34

Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama pseudo binario (Fe.Cr.Ni)	27
Figura 2. Zonas de la unión soldada	29
Figura 3. Curva esfuerzo deformación.....	37

Resumen

Título: Efecto de los procesos de soldadura sobre las propiedades mecánicas de los aceros inoxidables dúplex: Estado del arte*

Autores: García Barajas Anggie Julieth, Tarazona Grajales Daniela**

Palabras clave: Acero inoxidable dúplex, procesos de soldadura, propiedades mecánicas.

Descripción: El acero inoxidable dúplex (DSS) se caracteriza por su matriz bifásica de ferrita (α) y austenita (γ) en cantidades prácticamente iguales, por tanto, estos materiales se caracterizan por poseer un buen comportamiento mecánico y un gran desempeño ante ambientes altamente corrosivos, por lo que son usados en diferentes industrias químicas, petroleras, obras civiles, entre otras. En la mayoría de proyectos de ingeniería, las piezas fabricadas requieren ser soldadas para su operación, por esta razón, el presente proyecto se enfocó en establecer los principales procesos de soldadura empleados en diferentes aceros inoxidables dúplex (DSS), así mismo, se estudió la relación entre los procesos de soldadura, las variables del proceso empleadas, la formación de fases secundarias no deseadas durante el proceso de soldadura y los cambios en el comportamiento mecánico de diversos DSS estudiados por diferentes autores; determinando que en los cordones de soldadura se precipitaron principalmente fase sigma (σ) y nitruros de cromo (Cr_2N), sufriendo un incremento en los valores de su límite elástico, la resistencia a la tracción y la dureza, originando que en esta región las dislocaciones no se puedan mover, por tanto esta área es acumuladora de esfuerzos, lo que la hace más frágil, de manera que la pieza es propensa a sufrir fractura en esa zona.

*Proyecto de grado

**Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Mauricio Rincón Ortiz, Doctor en ciencia y Tecnología Mención Materiales. Codirectora: Ana María Pérez Ceballos, Doctora en Ingeniería.

Abstract

Title: Effect of welding process on the mechanical properties of duplex stainless steel: A review*

Authors: García Barajas Anggie Julieth, Tarazona Grajales Daniela**

Keywords: Duplex stainless Steel, welding process, mechanical properties.

Description: Duplex stainless steel is characterized by its biphasic matrix of ferrite (α) and austenite (γ) in same quantities, therefore these materials have good mechanical behavior and great performance in highly corrosive environment, which is why they are used in chemical and oil industries, civil works, etc. The manufactured parts require to be welded for their operation, due this reason, the project focused on stablishing the principal welding processes used on different Duplex stainless steels (DSS), in addition, the project studied different welding processes, their variables used, the formation of secondary phases during the processes and the changes in mechanical behavior of various DSS studied by different authors; this determined that in the weld zone were precipitation mainly sigma phase (σ) and chromium nitrides (Cr_2N), The weld area would suffer an increase in the values of its elastic limit, tensile strength and hardness, It will cause that in this region the dislocations can't move, therefore would be a high stress zone, in consequence it become more fragile and it's propense to suffer a fracture easier.

*Degree Work

**Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Adviser: Ph.D Mauricio Rincón Ortiz. Coadviser: Ph.D. Ana María Pérez Ceballos.

EFFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

Introducción

La soldadura es un proceso de unión de dos o más piezas producido por la fusión entre las superficies de contacto, esto se logra calentando hasta una temperatura adecuada o mediante la aplicación de presión entre ellas (R. Singh, 2012). Durante el proceso de soldadura en los aceros, se producen variaciones en los ciclos térmicos generando en las piezas alteraciones en su composición, distribución y tamaño de las fases que constituyen el material, dando lugar a transformaciones microestructurales y provocando cambios en sus propiedades mecánicas (Küçüköner et al., 2020)

Los aceros inoxidables dúplex (DSS, por sus siglas en inglés) se conforman principalmente por elementos como cromo (18-28%), níquel (4-6%) y molibdeno (1.5-3%), también son llamados aceros austeno-ferríticos o bifásicos, debido a que están constituidos por fracciones volumétricas aproximadamente iguales: 50% de austenita (γ) y 50% de ferrita (α) (Pan et al., 2020). Esta combinación le proporciona al material una mayor resistencia mecánica, alto límite elástico, mayor maleabilidad, soldabilidad y resistencia a la corrosión (Köhler et al., 2021). Estas propiedades permiten que estos aceros se empleen actualmente en una gran variedad de aplicaciones industriales, como en plantas petroquímicas, industria del gas, el sector de la construcción, industria marina, industria energética, entre otros (Luchtenberg et al., 2019).

Como consecuencia de la soldadura, los (DSS) presentan variaciones en sus propiedades que se evidencian por la presencia de fases secundarias no deseadas como ferrita primaria (α'), sigma (σ) y chi (χ); adicionalmente, se presentan carburos y nitruros (Marques et al., 2020). Durante estos procesos las piezas son sometidas a temperaturas muy elevadas, esto puede provocar agrietamiento

EFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

y segregación de los elementos de aleación disminuyendo la vida útil de los equipos (Wang et al., 2020).

En la actualidad, para la fabricación de equipos industriales generalmente se emplean procesos de soldadura, por lo tanto, resulta importante analizar la influencia que estos procesos generan sobre la microestructura y las propiedades mecánicas en los aceros inoxidables dúplex (DSS) (Saravanan et al., 2020).

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Determinar, mediante revisión bibliográfica, la variación en las propiedades mecánicas por la presencia de fases secundarias no deseadas producidas durante la soldadura en aceros inoxidables dúplex (DSS).

1.2. Objetivos específicos

Identificar los tipos de soldadura empleados en diferentes campos de la industria para la unión de piezas fabricadas en acero inoxidable dúplex (DSS).

Establecer los cambios microestructurales que se presentan en los aceros inoxidables dúplex (DSS) durante los procesos de soldadura.

Evaluar la influencia de las fases secundarias no deseadas en la resistencia a la fractura, agrietamiento y ductilidad en aceros inoxidables dúplex (DSS) como resultado de la soldadura.

2. Fundamentación teórica

2.1. Aceros inoxidables dúplex (DSS, por sus siglas en inglés)

El acero inoxidable dúplex (DSS, por sus siglas en inglés) se caracteriza principalmente por tener una matriz bifásica de ferrita (α) y austenita (γ) en fracciones volumétricas prácticamente iguales. Estas aleaciones están compuestas por hierro (Fe), cromo (Cr) y molibdeno (Mo), adicional a esto, contienen níquel (Ni) y nitrógeno (N) como estabilizadores de la austenita que proporcionan un balance de las dos fases principales (Nigon et al., 2021). El Cr aumenta la resistencia a la corrosión en la austenita mientras que el Ni disminuye la cantidad de ferrita. Por otro lado, el N provoca que el límite a la fluencia aumente, reduciendo la formación de compuestos intermetálicos y el Mo por su parte aumenta la resistencia a la corrosión por picado (Iacoviello et al., 2018). El acero inoxidable austenítico posee una gran soldabilidad y el ferrítico una alta resistencia al agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC), es así como la combinación de estas dos fases en los aceros DSS ha sido de gran utilidad para la industria (Rajput et al., 2019). En la tabla 1 se presenta la composición química de diferentes DSS.

Las propiedades que poseen los aceros inoxidables dúplex los hace adecuados para su uso en diversas industrias. Debido a su alta resistencia a la corrosión son utilizados para la fabricación de ejes e impulsores industriales, plantas químicas y en plantas de tratamientos de gases, por otra parte, su ductilidad lo convierte en un material utilizado en la industria de la construcción especialmente para la infraestructura de puentes (de Souza & Vilarinho, 2020).

EFFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

Tabla 1.

Composición química de diferentes aceros inoxidables dúplex

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	N	Cr	Mo	Cu	Fe	Autores
DSS 2205	0.02	0.57	1.25	0.03	-	5.30	0.14	22.57	3.04	-	Bal	(Jia et al., 2019)
DSS 2304	0.018	0.360	1.350	0.025	0.001	3.57	0.001	22.55	0.26	0.42	Bal	(Salvador & Antunes, 2016)
UNS S32202	0.028	0.077	0.44	0.008	0.016	2.47	0.14	21.36	0.26	0.04	Bal	(Amiri et al., 2021)
DSS 2101	0.024	0.64	4.9	-	-	1.56	0.21	21.4	0.28	0.31	Bal	(L. Ma et al., 2017)
DSS 2207	0.030	0.90	0.61	0.024	0.007	8.70	0.115	22.82	3.37	0.07	Bal	(Kang & Lee, 2012)
UNS S82031	0.03	0.42	1.09	0.024	0.001	2.8	0.186	20.0	1.20	0.33	Bal	(Baghdadchi et al., 2021)
UNS S32750	0.03	0.39	0.79	0.03	-	6.42	0.26	24.86	3.63	-	Bal	(Gupta et al., 2018)
UNS S32760	0.03	0.93	0.82	0.02	0.01	6.3	0.23	25.7	3.4	0.61	Bal	(Yousefieh et al., 2011)

2.2. Soldadura en aceros inoxidables dúplex (DSS, por sus siglas en inglés)

Los procesos de soldadura se basan principalmente en la coalescencia entre las caras de piezas metálicas, esto se da mediante fusión localizada empleando metales de aporte y fuentes de calor para elevar la temperatura en las zonas a unir o por la aplicación de presión en la junta (Jenney & O'Brien, 2001). Existen diversos procesos de soldadura, su principal diferencia es la fuente de calor empleada para la fusión en las caras de las piezas metálicas a unir, es así como se pueden encontrar procesos con gas de protección, por arco eléctrico y mediante la aplicación de presión.

Para la unión de piezas fabricadas en aceros inoxidables dúplex se pueden emplear diversos procesos de soldadura como: soldadura por arco sumergido (SAW, por sus siglas en inglés), soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW, por sus siglas en inglés), soldadura por arco metálico con gas (GMAW, por sus siglas en inglés), soldadura por arco con electrodo de Tungsteno

EFFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

y gas de protección (GTAW, por sus siglas en inglés), soldadura de arco con núcleo fundente (FCAW, por sus siglas en inglés), soldadura por láser (LBW, por sus siglas en inglés), soldadura por electro escoria (ESW, por sus siglas en inglés), soldadura por arco de plasma (PAW, por sus siglas en inglés) y soldadura por fricción-agitación (FSW, por sus siglas en inglés) (Luchtenberg et al., 2019).

En la soldadura de los DSS, el aporte de calor afecta la velocidad de enfriamiento generando fenómenos de expansión y contracción térmica, esto a su vez, afecta la microestructura final de la soldadura en la zona de fusión (FZ, por sus siglas en inglés) y en la zona afectada térmicamente (HAZ, por sus siglas en inglés) dando lugar a esfuerzos residuales añadidos (Tasalloti et al., 2017). En la zona donde se presentan los picos de mayor temperatura en el ciclo térmico suele producirse crecimiento de grano, baja ductilidad, baja tenacidad y mala resistencia al agrietamiento por el medio ambiente (Ozlati & Movahedi, 2018).

2.3. Efecto de los procesos de soldadura en la microestructura de aceros inoxidables dúplex (DSS)

La gran mayoría de los materiales están limitados para no ser trabajados a altas temperaturas, esto debido a que su estabilidad térmica es limitada pues está relacionada con la precipitación de fases secundarias no deseadas, crecimiento de grano y disolución lo que afecta las propiedades mecánicas del material (Jacob et al., 2020). Aun así, los procesos de soldadura son inevitables en la fabricación de equipos industriales, lo que hace que los materiales sean sometidos a ciclos térmicos generando desequilibrio en sus fases (Zhang et al., 2020).

Actualmente cerca del 50% de las fallas en los DSS se deben a la precipitación de fases secundarias no deseadas mostradas en la tabla 2, como son ferrita primaria (α'), sigma (σ), chi (χ),

EFFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

carburos y nitruros de cromo, quienes provocan una disminución en sus propiedades mecánicas y su resistencia a la corrosión amenazando la integridad de los equipos industriales en su uso diario (Kim et al., 2020).

Los DSS presentan mejores características y propiedades cuando se emplean a temperaturas inferiores a 250°C, es por esta razón que las juntas soldadas suelen debilitar y amenazar la integridad de los equipos, especialmente cuando son sometidos a fatiga térmica pues esta es altamente dependiente de la microestructura (Xie et al., 2020).

Se han realizado diversas investigaciones sobre la formación de estas fases y su efecto en las propiedades del material, siendo la fase σ la más estudiada (Silva et al., 2020) (del Abra-Arzola et al., 2018). La fase σ está compuesta por Fe, Cr, Mo, entre otros elementos, suele formarse en las regiones de mayor energía como los límites de grano y las interfases afectando la resistencia a la corrosión, resistencia a la fractura, la ductilidad y la tenacidad (Sieurin & Sandström, 2007), además los estabilizadores de la ferrita como el Mo favorecen la formación de esta fase. En relación con su formación, la fase sigma σ se da a diferentes temperaturas dependiendo del tiempo de exposición al que sea sometido la pieza, comúnmente, al estar expuestas durante 10 horas a 700°C, 1 hora a 800°C o 20 minutos a 900°C estas inician su precipitación. Otra fase analizada es la χ , se compone también por Fe, Cr y Mo, pero se forma antes que la fase σ ya que requiere menos tiempo de exposición (1 hora a 700°C o 20 minutos a 800°C) (Shin et al., 2013), aunque puede encontrarse desde temperaturas de 550°C.

Además, algunos nitruros y carburos de cromo como Cr_2N se forman debido a la exposición de las piezas a elevadas temperaturas (600-1100°C) que pueden ser alcanzadas durante la manufactura, conformado o soldadura (Abra-arzola et al., 2018). Adicionalmente, el enfriamiento

EFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

rápido puede promover la formación de las mismas. Estas fases provocan en los equipos pérdida de ductilidad, disminución de la tenacidad y menor resistencia a la corrosión (J. Singh & Shahi, 2019).

Tabla 2.

Fases secundarias no deseadas comúnmente precipitadas en DSS

Fases no deseadas en DSS	Formula química	Temperatura (°C)
Fase sigma (σ)	Fe-Cr-Mo	600-1000
Nitruro de Cromo	CrN	900-1000
Nitruro de Cromo	Cr ₂ N	700-900
Carburo	M ₇ C ₃	950-1050
Carburo	M ₂₃ C ₆	600-950
Chi (χ)	Fe ₃₆ Cr ₁₂ Mo ₁₀	700-900
Fase T	-	550-650
Fase R	Fe-Cr-Mo	550-650
Fase π	Fe ₇ Mo ₁₃ N ₄	550-600

Nota. Adaptado de (Verma et al., 2017)

El tratamiento térmico de recocido es utilizado normalmente luego del proceso de soldadura ya que restablece el equilibrio entre α y γ , además reduce la segregación de los elementos de aleación que puede haber ocurrido en el enfriamiento del metal de soldadura. Sin embargo, el recocido puede también influir en la formación de precipitados si la temperatura y la velocidad de enfriamiento no son correctas. Para obtener propiedades favorables en aceros DSS se utiliza el recocido a una temperatura superior a 1000°C, esto provoca un aumento en el tamaño de grano

EFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

ferrítico δ disminuyendo los sitios de nucleación y a su vez, reduciendo la formación de la fase σ (Badji et al., 2008)

3. Metodología

El proyecto se fundamentó en una profunda revisión bibliográfica que permitió dar respuesta y solución a las inquietudes y objetivos planteados anteriormente. El proceso se desarrolló en el transcurso de diferentes etapas que se exponen a continuación:

Etapa 1. Investigación de documentos: inicialmente se realizó una compilación de diferentes documentos de investigación que planteaban temáticas similares a las que se trataron en este proyecto, estos archivos se extrajeron de la biblioteca virtual y los recursos electrónicos a los que la universidad permite el acceso.

Etapa 2. Selección y organización de documentos: Luego de conseguir una gran cantidad de información con los documentos recopilados, se seleccionaron y organizaron, es así como se depuraron los que tienen menos información sobre las temáticas a tratar y los demás archivos se clasificaron de acuerdo con los objetivos planteados.

Etapa 3. Recolección de la información: Seguido de la clasificación de los documentos, se recopiló la información más importante y relevante de cada archivo con el fin de dar solución a los objetivos planteados. Primero se determinaron los tipos de soldadura usados para los aceros inoxidables dúplex, luego los cambios microestructurales que se presentaron por las altas temperaturas y finalmente cómo esos cambios en la microestructura produjeron variaciones en las propiedades mecánicas de la junta.

EFFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

Etapla 4. *Elaboración del informe:* Para finalizar el proyecto se organizó, analizó y redactó toda la información recolectada en forma de informe dando solución a las inquietudes y cumpliendo satisfactoriamente los objetivos de este.

4. Resultados

El proyecto se dividió en tres principales categorías que se investigaron mediante revisión bibliográfica. El primer paso para determinar los cambios microestructurales que se producen en los aceros inoxidables dúplex luego de ser soldados es esclarecer los principales procesos de soldadura aplicados a este tipo de materiales, ya que cada uno posee diferentes composiciones en el metal de aporte, en los gases de protección y además, emplean diferente temperaturas y tiempos de exposición.

4.1. Soldadura en aceros inoxidables dúplex

Los primeros aceros inoxidables dúplex que se produjeron industrialmente, llamados DSS de primera generación, tenían como problema que la resistencia a la corrosión se veía afectada luego de someterse a procesos de soldadura, es así como a la producción de DSS de segunda generación se adicionó entre un 0.15 – 0.30% Ni, esto incrementó la resistencia a la corrosión por picado y por rendijas (A Hosseini et al., 2019).

Comúnmente, durante la manufactura se emplea soldadura en las piezas, para aplicar soldadura a DSS es importante una correcta elección del proceso ya que este va a depender de las características que requiera el equipo, las condiciones de servicio, reproducibilidad, forma de la junta, entre otros (Chaudhari et al., 2019). Con la información recopilada se pudo establecer que

EFFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

de los posibles procesos de soldadura a usar en DSS los más empleados e investigados son: SMAW, GTAW, FCAW, LBW, PAW y FSW.

4.1.1. Soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW, por sus siglas en inglés)

En este proceso de soldadura, el calor requerido para la fusión se obtiene por el arco eléctrico que se produce entre el metal base y un electrodo metálico revestido que a su vez actúa como metal de aporte (Yuan et al., 2014), este método utiliza para su protección la descomposición del revestimiento del electrodo ya que este se caracteriza por generar una atmósfera protectora, estabilidad, penetración del arco, remoción de impurezas, prevención de la oxidación, entre otras (Jenney & O'Brien, 2001).

Este proceso es económico, versátil y se puede emplear fácilmente para equipos que poseen geometrías complejas o en los casos donde la protección y posición son difíciles de lograr, adicional a esto, SMAW es usada principalmente para estructuras de gran tamaño y se puede combinar con otros procesos de soldadura para alcanzar una mayor eficiencia (A Hosseini et al., 2019; Sulaiman et al., 2020).

Los DSS requieren de un control mayor sobre los parámetros de soldadura para evitar los defectos físicos, tensiones residuales y deterioro en las propiedades mecánicas (Z. Zhang et al., 2017). En el proceso SMAW algunas características como la longitud del arco, el tipo de electrodo de relleno, el diámetro del electrodo y la polaridad de la corriente, pueden influir directamente sobre los aspectos anteriormente mencionados (Ahmed et al., 2018).

Un estudio realizado demostró que la composición química del metal depositado influye más en la relación austenita-ferrita que la velocidad de enfriamiento tras la soldadura, aun así, es

EFFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

importante un control de las variables del proceso para que el enfriamiento sea lo suficientemente rápido como para evitar la precipitación de fases no deseadas (ferrita δ y nitruro de cromo) y lo suficientemente lento para dar tiempo a la formación de la austenita (Dandekar et al., 2018).

4.1.2. Soldadura por arco con electrodo de tungsteno y gas de protección (GTAW, por sus siglas en inglés)

Conocida como TIG, por sus siglas en inglés, es un proceso que involucra el uso de un electrodo de Tungsteno no consumible que permite mantener el arco formado, éste está protegido gracias a un gas agregado externamente a la operación, GTAW es el proceso por arco más versátil ya que se puede emplear o no metal de aporte y se pueden soldar piezas con espesores menores a 1 mm, también se puede usar para cualquier posición de soldadura y para aleaciones ferrosas y no ferrosas (Aracil, 2018).

Para emplear el proceso GTAW sobre DSS los parámetros principales a tener en cuenta son la corriente de soldadura, el flujo del gas inerte y la velocidad a la que se realiza el cordón (Mondal et al., 2021). Al mantener estos parámetros controlados se mejora en gran medida la calidad de las uniones soldadas en piezas fabricadas en DSS. La optimización de estos factores mejora aún más las características y propiedades de la junta soldada, para esto se pueden emplear métodos como el análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés), este método se expresa como un conjunto de variables combinadas no relacionadas en un espacio más pequeño para evitar la pérdida de información, en el caso de GTAW facilita el análisis y acotamiento de parámetros (Gupta et al., 2018; Mondal et al., 2021).

Se ha encontrado otra manera de mantener y mejorar las propiedades en la junta soldada, para esto el metal base debe tener un mínimo de 0.14%N (Kotecki, 2010) ya que el nitrógeno favorece

EFFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

la protección ante la corrosión, en el caso de GTAW es importante que la capa de gas protector no contenga más de 7% N ya que puede causar porosidad en la unión (Reyes et al., 2017).

4.1.3. Soldadura de arco con núcleo fundente (FCAW, por sus siglas en inglés)

Es un proceso semiautomático con alambre tubular autoprotegido. Es principalmente empleado para la recuperación de piezas anteriormente usadas y para el recargue de piezas nuevas, como metal de aporte se usan aleaciones de hierro con una estructura ferrítica con carburos y boruros precipitados (Gualco et al., 2014), esto genera en la zona de soldadura una escoria que aumenta la resistencia a la abrasión y a la erosión.

Aunque FCAW es una de las tecnologías más populares para DSS por la conservación de las propiedades mecánicas y la alta tasa de deposición, este proceso tiene como problema principal que el ciclo produce un desbalance en el equilibrio ferrita/austenita y si se incrementa el aporte de calor varían los parámetros del proceso y adicionalmente se produce la precipitación de fases secundarias como la fase σ que reduce la resistencia a la corrosión y a la soldadura (Li et al., 2018).

Este método genera una combinación de características, donde el metal depositado brinda propiedades que el metal base por sí solo no tiene, dando con esto una mejora a la junta soldada (Sathish Kumar et al., 2020). Esto se puede alcanzar mediante el revestimiento de la superficie con una aleación compatible y resistente a la corrosión, ya que durante la soldadura la resistencia a la corrosión puede verse afectada por la formación de precipitados intermetálicos o de austenita secundaria gracias a la redistribución de los elementos de aleación, por lo que se debe tener un control sobre la dilución y el aporte de calor. Al haber una gran diversidad en las combinaciones de los electrodos, fundentes y parámetros de soldadura se deben tener en cuenta otros aspectos como la corriente y la tensión del arco dentro del cordón. (Murugan & Kannan, 2007).

EFFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

4.1.4. Soldadura con láser (LBW, por sus siglas en inglés)

El proceso de soldadura láser es ampliamente utilizado en aplicaciones de la industria aeroespacial, naval, electrónica y demás, esto gracias a sus ventajas como el bajo aporte de calor que requiere y la capacidad para soldar materiales con baja resistencia térmica (Ghosh et al., 2019), este proceso también permite combinar la capacidad de controlar la soldadura, repetibilidad, automatización, dando como resultado una pequeña zona afectada térmicamente (Bunaziv et al., 2020). Las ventajas de la aplicación industrial de la soldadura láser incluyen un menor mantenimiento y una menor necesidad de enfriamiento (Landowski, 2019).

Aunque LBW tiene grandes ventajas sobre otros métodos de soldadura existen otras limitaciones en la aplicación de este proceso en DSS, ya que la soldadura láser emplea menor energía y un enfriamiento rápido que restringe la transformación de ferrita a austenita en estado sólido mediante difusión, por lo tanto, se produce un desbalance en la proporción de las fases; adicionalmente promueve la formación de nitruros causada por la sobresaturación de nitrógeno en la ferrita (Baghdadchi et al., 2021).

Para obtener piezas soldadas mediante LBW con mejores propiedades mecánicas se deben controlar los efectos de la densidad de energía empleada, el medio de protección para promover la formación de austenita, la homogeneidad de la dureza y la resistencia al corte (W. W. Zhang et al., 2018), adicionalmente se evalúan diversos parámetros para este tipo de proceso, entre ellos está la velocidad de soldadura, la geometría de la pieza, profundidad y ancho del cordón, debido a esto se pueden emplear métodos híbridos, donde se combinan los beneficios de la soldadura por láser con otros métodos como SMAW, GTAW o PAW (Kik & Górka, 2019).

EFFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

4.1.5. Soldadura con arco de plasma (PAW, por sus siglas en inglés)

Es un proceso automatizado que produce la fusión al iniciar un arco entre un electrodo no consumible y el charco de metal de aporte, se usa un electrodo de tungsteno hueco en el medio por donde el plasma es calentado; adicional a esto, el gas ionizado que se desprende de la antorcha y un gas externo incorporado son los encargados de generar la protección atmosférica que el proceso requiere (Jenney & O'Brien, 2001). PAW presenta ventajas significativas sobre otros métodos como GTAW ya que favorece la profundidad de penetración, la distorsión térmica y la energía concentrada durante el proceso (Taban, 2008).

La técnica más popular por PAW se conoce como *keyhole* y se produce cuando el arco de plasma incide en la zona de unión de las piezas, funde el metal y se forma un baño de soldadura, gracias a su elevada velocidad al penetrar el arco se crea un agujero dentro del baño, al mover el soplete el agujero va a generar el flujo de metal y formará el cordón de soldadura (Migiakis et al., 2010).

Diversas investigaciones sobre este método han determinado la influencia de los gases de protección usados sobre las propiedades mecánicas, como la dureza y la resistencia al impacto. Se ha demostrado que las mejores propiedades mecánicas en la zona de soldadura se obtienen con una mezcla entre argón y un 2% de nitrógeno; el nitrógeno favorece la tenacidad y la resistencia al impacto de la soldadura (Devendranath Ramkumar et al., 2015; Migiakis et al., 2010).

Para optimizar los parámetros de soldadura en PAW se emplean herramientas como ANOVA que permite estudiar independientemente cada variable, para este método se tienen en cuenta principalmente la corriente de soldadura, la velocidad de soldadura y la longitud del arco de control (Bharathi et al., 2018).

EFFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

4.1.6. Soldadura por Fricción-Agitación (FSW, por sus siglas en inglés)

En aceros inoxidable dúplex es conveniente conservar el equilibrio entre las fases ferrítica y austenítica por lo que un proceso de soldadura en estado sólido, como FSW es de gran importancia ya que los procesos de soldadura por fusión tienden a promover la formación de ferrita producto de la solidificación del material, provocando un desbalance en las fases ferrita y austenita. (Emami et al., 2018)

El proceso de soldadura FSW consiste en unir dos láminas por medio de fricción y presión entre ellas, provocando que estas lleguen a su temperatura de soldadura hasta completar el proceso. Por medio de este proceso se pueden soldar piezas en un solo ciclo obteniendo uniones con excelentes propiedades mecánicas (Piccini & Svoboda, 2017).

Al ser un método de unión en estado sólido es adecuado para mantener las propiedades mecánicas, microestructurales y de resistencia a la corrosión de las piezas soldadas ya que no hay cambios de composición química durante la fusión y evita la segregación de elementos de aleación (Santos et al., 2018) puesto que el tiempo de aplicación del proceso es menor a un minuto, algunos estudios han revelado que una buena soldadura por fricción se puede lograr en menos de 40 segundos. Además, el proceso se puede automatizar lo que permite economizar costos (Meinhardt et al., 2017).

FSW posee como parámetros principales la presión axial de calentamiento, el tiempo de calentamiento, la presión de fricción y el tiempo de fricción (Asif et al., 2016), es importante que estos se encuentren controlados requiriendo la optimización de los parámetros (Udayakumar et al., 2014). Esto se puede lograr mediante el uso de técnicas de optimización multiobjetivo como el análisis de regiones grises (GRA), esta herramienta tiene la capacidad de identificar las

EFFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

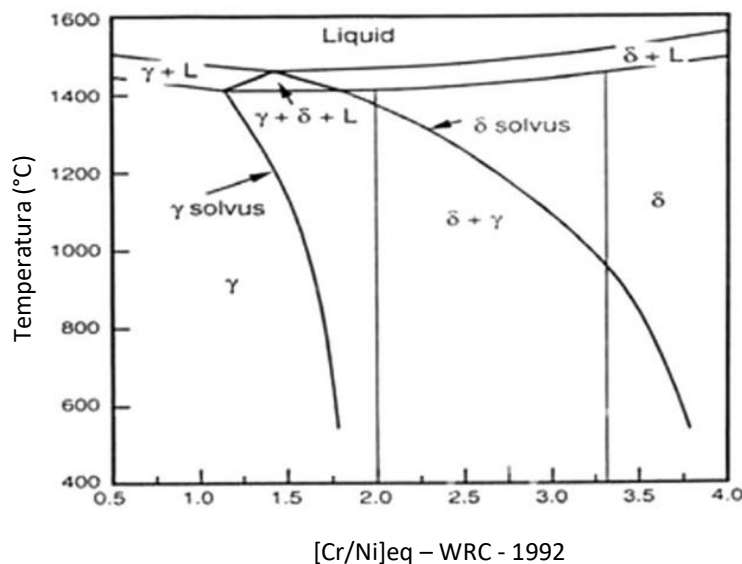
combinaciones de parámetros optimizados sin necesidad de una gran cantidad de información (Manoj Samson et al., 2020).

4.2. Microestructura de los aceros DSS soldados

El diagrama pseudobinario Fe-Cr-Ni, presentado en la figura 1, es una herramienta importante para conocer la solidificación en DSS debido a la relación Cr_{eq} / Ni_{eq} de estos aceros, la ferrita δ se nuclea totalmente al iniciar la solidificación pues proviene directamente del líquido L, mientras la austenita γ se nuclea por debajo de la temperatura de solvus ferrítico ($L \rightarrow L + \delta \rightarrow \delta + \gamma$). El rango crítico de temperaturas para alcanzar el equilibrio de las fases es 1200 a 800 °C. (Verma & Taiwade, 2017)

Figura 1.

Diagrama pseudo binario (Fe.Cr.Ni)



Nota. Adaptado de (Verma et al., 2017)

EFFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

Dado que la soldadura es el resultado de un ciclo térmico con rápido calentamiento y enfriamiento, la distribución de la microestructura resulta ser muy heterogénea presentando cambio en las propiedades mecánicas en diferentes microrregiones de la unión soldada, por esto es importante controlar los parámetros de soldadura empleados en cada proceso, pues estos afectan la velocidad de enfriamiento la cual es importante para controlar la formación de fases secundarias en los DSS, ya que una alta velocidad de enfriamiento favorece la formación de Cr_2N mientras una baja velocidad incrementa la formación de γ y limita la precipitación de fase σ (Abra-arzola et al., 2018). En la tabla 3 se aprecian diversos parámetros de soldadura empleados por diferentes autores que estudiaron los cambios microestructurales en DSS.

Tabla 3.

Parámetros de soldadura para diferentes procesos y aceros DSS

Proceso	Material	Voltaje (v)	Corriente (A)	Velocidad (mm/s)	Gas de protección	Entrada de calor (J/mm)	AUTOR
GTAW	DSS 2205	10-12	80-150	0.66-1.33	95%Ar+5%N ₂	1050	(Paulraj & Garg, 2015)
GTAW	UNS S32202	12	135	1.28	95%Ar+5%N ₂	1056	(Amiri et al., 2021)
GTAW	UNS S32760	15	124	1.67	-	1120	(Yousefieh et al., 2011)
FCAW	DSS 2205	20-26	160-240	3-4.3	-	1066	(Li et al., 2018)
FCAW	DSS 2304	23	174	3.50	75%Ar-25%CO ₂	1143	(Salvador & Antunes, 2016)
FCAW	DSS 2207	29	170	4.6	100% CO ₂	1030	(Kang & Lee, 2012)
SMAW	DSS 2205	19-24	70	2.1	-	600	(Verma et al., 2017)
SMAW	UNS S32750	22	100	1.3	-	1100	(Gupta et al., 2018)
SMAW	DSS 2101	25-27	120-130	23	-	820-1500	(L. Ma et al., 2017)
LBW	DSS 2205	25	101	10	Argón puro (Ar)	253	(Valiente Bermejo et al., 2021)
LBW	UNS S32750	13	100	1	Argón puro (Ar)	1300	(da Cruz Junior et al., 2021)

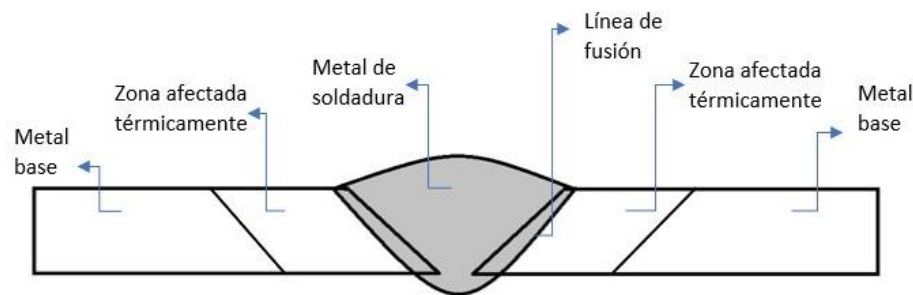
EFFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

LBW	S82031	-	150	30	Argón puro (Ar)	-	(Baghdadchi et al., 2021)
Nitrógeno puro(N)							
PAW	DSS 2205	20-30	60-70	4.16-5	Argón puro (Ar)	3914	(Bharathi et al., 2018)
PAW	DSS 2304	-	165	5	Argón puro (Ar)	-	(Tan et al., 2011)
PAW	UNS S32750	-	-	3.33	Argón puro (Ar)	1200	(Taban & Kaluc, 2011)
FSW	DSS 2205	-	-	0.5-1.17	-	-	(Jia et al., 2019)
FSW	UNS S32101	-	-	1.67	-	-	(Marques et al., 2020)
FSW	UNS S32750	-	-	0.83-3.33	-	-	(C. Y. Ma et al., 2020)

La junta soldada se divide en varias regiones donde las más representativas son, la zona de soldadura (WMZ, por sus siglas en inglés), la zona afectada por alta temperatura (HT-HAZ, por sus siglas en inglés), la zona afectada por baja temperatura (LT-HAZ, por sus siglas en inglés) y el metal base (BM, por sus siglas en inglés). La tensión residual influye de manera negativa en el rendimiento de la soldadura, especialmente en las propiedades de resistencia a la tracción y fatiga, por esta razón, es muy importante conocer como el cambio en la microestructura afecta la deformación de los aceros inoxidable dúplex sometidos a soldadura (Chaudhari et al., 2019).

Figura 2.

Zonas de la unión soldada



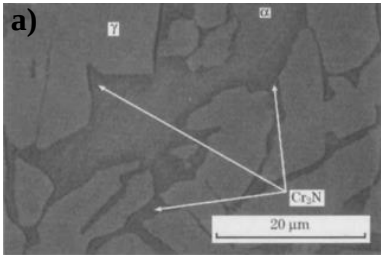
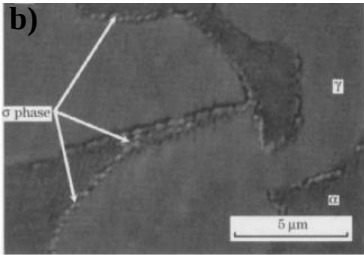
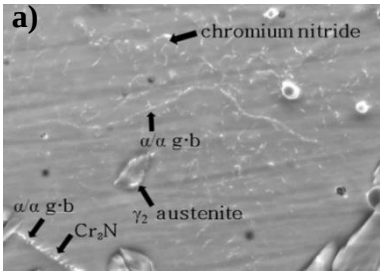
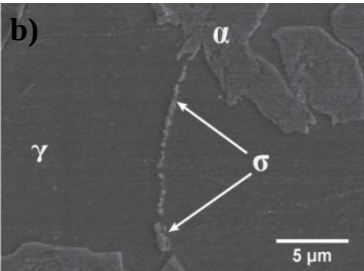
Nota. Adaptado de (Dandekar et al., 2018)

EFFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

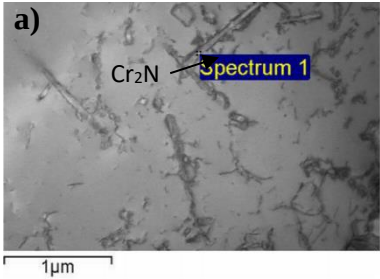
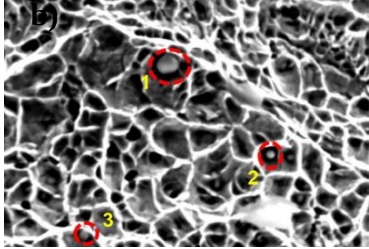
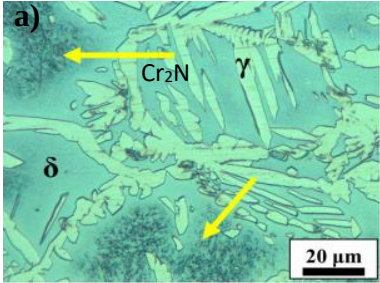
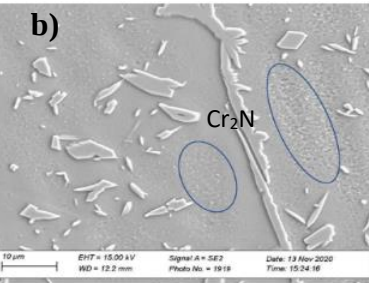
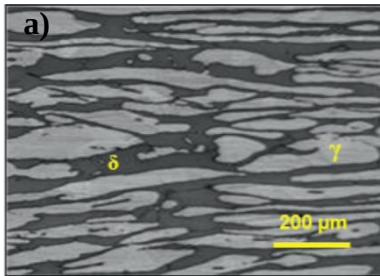
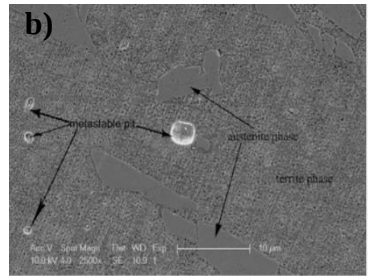
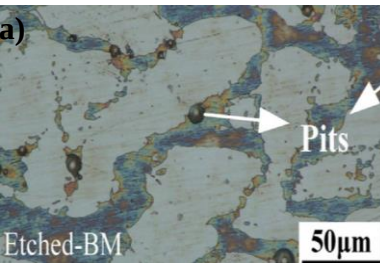
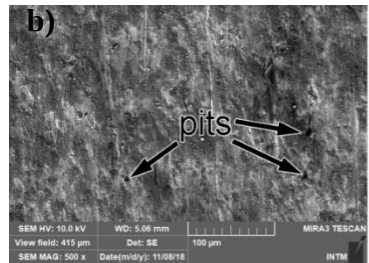
Normalmente, los DSS son muy resistentes al agrietamiento por solidificación debido a su baja cantidad de impurezas, sin embargo, los ciclos térmicos provocan la precipitación de fases secundarias indeseables estableciendo un amplio campo de estudio para analizar el comportamiento de DSS en presencia de estas fases. La tabla 4 presenta las micrografías de diferentes procesos de soldadura donde se observa presencia de distintas fases e intermetálicos resultados de emplear los parámetros presentados en la tabla 3.

Tabla 4.

Micrografías de las fases secundarias no deseadas en los diferentes DSS

Proceso de soldadura	Microestructura	Fases secundarias encontradas	Autor
GTAW		Cr ₂ N - σ	a) (Yousefieh et al., 2011)
			
FCAW		Cr ₂ N - σ	a) (Kang & Lee, 2012)
			b) (Li et al., 2018)

EFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

SMAW	 	Cr ₂ N – óxidos	a) (L. Ma et al., 2017) b) (Gupta et al., 2018)
LBW	 	Cr ₂ N	a) (Baghdadchi et al., 2021) b) (Valiente Bermejo et al., 2021)
PAW	 	Cr ₂ N	a) (Bharathi et al., 2018) b) (Tan et al., 2011)
FSW	 	-	a) (C. Y. Ma et al., 2020) b) (Marques et al., 2020)

En los procesos de soldadura GTAW y FCAW de la tabla 4 se muestran las micrografías SEM de 3 aceros DSS (UNS S32760, DSS 2207 y DSS 2205) donde se presentan precipitados de Cr₂N y fase σ ; en los procesos GTAW como gas de protección los investigadores utilizaron una mezcla de Ar y N₂, mientras que para FCAW emplearon una mezcla de Ar y CO₂. El UNS S32760

EFFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

trabajado por Yousefieh et al. (2011) en GTAW (a) y el DSS 2207 de Kang & Lee (2012) en FCAW (a) contienen precipitados de Cr_2N los cuales son el resultado de un bajo aporte de calor y una rápida velocidad de enfriamiento en el proceso, ya que si aumenta la velocidad de enfriamiento el contenido de ferrita aumenta y el de austenita disminuye, la austenita tiene una alta solubilidad de N, por lo que éste se acumula en los límites y granos de ferrita para unirse con el Cr y formar Cr_2N , otros investigadores han encontrado que los DSS con al menos 0,3 % en peso de N presentan tasa relativamente alta de nitruros en los procesos mencionados anteriormente (Zhang et al., 2016).

En las micrografías (b) del UNS S32760 para GTAW (Yousefieh et al., 2011) y el DSS 2205 para FCAW (Li et al., 2018) está claro que la fase sigma σ está presente en las interfases ferrita-austenita, estos son los sitios preferenciales de nucleación para la presencia de fases intermetálicas, la fase σ es más perjudicial que otras fases mencionadas, su formación en DSS se da por la reacción eutectoide de la fase δ -ferrita $\Leftrightarrow \sigma + \gamma_2$, además, es un intermetálico duro y quebradizo enriquecido en Cr, Mo y Si, por esto, evitar su precipitación es de las funciones más importantes al realizar cualquier proceso de soldadura y motivo de diversas investigaciones.

Por otra parte, en el proceso de soldadura SMAW analizado por SEM (a) se nota la presencia de una fase precipitada de Cr_2N en el DSS 2101 como consecuencia de la alta presencia de Cr luego del envejecimiento a 700 °C durante 10 minutos según la investigación realizada por L. Ma et al. (2017). Adicional a esto en el proceso LBW, las micrografías (a) y (b) evidencian también la presencia de Cr_2N ubicados en la región intergranular de la matriz ferrítica como pequeños hoyos formados durante el proceso, es importante resaltar que estos estudios, como se muestra en la tabla 3, emplearon Ar puro como gas de protección, aunque Baghdadchi et al. en el 2011 comparó los

EFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

efectos del Ar y el N como gas de protección y encontró que las piezas soldadas con Ar presentaron mayores cantidades de nitruros, mientras en las piezas soldadas con N disminuyó la formación de estos.

En los demás aceros utilizados con el proceso SMAW no se observan intermetálicos, sin embargo, en el UNS S32750 (b) se encontró precipitados de óxidos metálicos complejos compuestos por Si, Fe, Mn y Ni, estos óxidos pueden ser causantes de fractura en el material debido a su limitada ductilidad (Gupta et al., 2018).

Bharathi et al., (2018) en su investigación de PAW (a) en DSS 2205, muestra una microestructura del metal base conformada por granos alargados de austenita sobre la matriz con una fracción de 52% δ - 48% γ y no se encontraron fases secundarias precipitadas, sin embargo (Tan et al., 2011) en el DSS 2304 (b) encontró nucleación de picaduras metaestables producidas por la formación de Cr_2N dentro de la matriz ferrítica, así mismo las micrografías reportadas por (C. Y. Ma et al., 2020) y (Marques et al., 2020) durante el estudio de FSW en UNS S32750 (a) y UNS S32101 (b) respectivamente, presentan picaduras de corrosión, siendo esto una característica resultante de micro fisuras propagadas hasta las superficies producto de la fricción a la que son sometidas las piezas durante este proceso de soldadura.

4.3. Influencia de las fases no deseadas en los aceros DSS soldados

Durante los procesos de soldadura se agrega el metal de aporte al metal base promoviendo un desbalance en las fases, adicional a esto la junta soldada es sometida a elevadas temperaturas y es así como la pieza puede presentar variaciones en algunas propiedades mecánicas como el límite elástico, la resistencia a la tracción, dureza y tenacidad. En la tabla 5 se muestran los principales

EFFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

tipos de soldadura empleados en la industria y los valores correspondientes a las mediciones de estas propiedades en algunos DSS usados antes y después de aplicado el proceso por diversos autores.

Tabla 5.

Propiedades mecánicas de los aceros sometidos a diferentes procesos de soldadura

Proceso	Material	Límite elástico (MPa)		Resistencia a la tracción (MPa)		Dureza (HV)		Tenacidad (J)	Autores
		Antes (BM)	Después (WMZ)	Antes (BM)	Después (WMZ)	Antes (BM)	Después (WMZ)	(WMZ)	
GTAW	DSS 2205	-	-	750	795	225	266	168 a 46°C	(Paulraj & Garg, 2015)
	UNS S32202	450	680	650	826	274	248	45 a 25°C	(Amiri et al., 2021)
FCAW	DSS2304	-	-	-	-	250	403	-	(Salvador & Antunes, 2016)
	DSS 2207	550	788	795	909	205	286	42 a 20°C	(Kang & Lee, 2012)
SMAW	DSS 2205	330	275	626	577	264	248	72 a 25°C	(Verma et al., 2017)
	UNS S32750	550	650	800	808	264	311	36 a 25°C	(Gupta et al., 2018)

La curva esfuerzo-deformación (ver figura 3) se construye al someter las probetas a un ensayo de tracción, esta ayuda a determinar los valores de límite elástico que se define como la tensión máxima que alcanza el material antes de deformarse permanentemente y la resistencia a la tracción que es el esfuerzo máximo que soporta el material antes de la rotura (Shokri et al., 2017).

Al comparar los valores mostrados en la tabla 5 se puede observar que tanto el límite elástico como la resistencia a la tracción tienen una tendencia a incrementar luego de aplicado el proceso de soldadura, esto debido a un endurecimiento por solución sólida causado por el aumento del contenido de Cr y que promueve la precipitación de Cr_2N , que tiene lugar en las inclusiones y límites de grano reduciendo la movilidad de las dislocaciones, disminuyendo la ductilidad y promoviendo una falla más temprana en las piezas de interés.

EFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

La tenacidad es la capacidad que tienen los materiales para absorber o acumular energía durante el impacto antes de alcanzar la rotura. En el 2021 Amiri et al. determinaron en su investigación que esta característica tiene una tendencia a disminuir luego de aplicar el proceso de soldadura, causado por una disminución en la proporción de ferrita presente, esta al ser más blanda y dúctil que la austenita posee mayor capacidad para absorber energía en el impacto. Dicho de otra manera, el aumento de austenita, luego de aplicado el proceso de soldadura, disminuye la tenacidad del material y en consecuencia, si la pieza es sometida a una mayor tensión de la que puede soportar se producen fisuras o grietas, estas son las discontinuidades más peligrosas, ya que una vez inician no se pueden reparar produciendo la pérdida total del componente. Por lo tanto, en caso de presentarse una falla, es más probable que esta inicie en la unión soldada debido al desbalance de las fases producido por el proceso aplicado.

Verma et al. en el 2017 encontraron que los procesos de soldadura que emplean mayor energía como GTAW, SMAW, FCAW y PAW, promueven la formación de austenita debido a su velocidad de enfriamiento más lenta, mientras los procesos de soldadura de menor energía como LBW y FSW, se caracterizan por una mayor velocidad de enfriamiento lo que disminuye la formación de austenita, es por esto que, aunque resulta favorable trabajar con procesos de menor energía, su aplicación se limita a piezas específicas y de menor tamaño, mientras los procesos de mayor energía a pesar de promover la formación de austenita, como se mencionó anteriormente, son los más usados gracias a su capacidad de aplicación a nivel industrial. GTAW es la mejor opción para la unión de piezas industriales fabricadas en DSS, ya que una correcta selección de parámetros de soldadura ayuda a controlar el balance entre las fases ferrítica y austenítica. Los

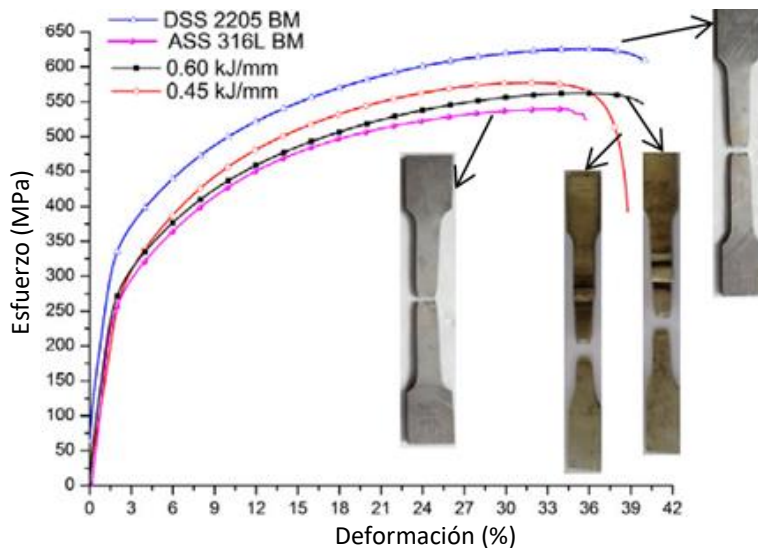
EFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

autores también recomiendan que debe haber un mínimo de 25% de austenita para conservar el buen funcionamiento que caracteriza estos materiales.

Una de las propiedades más importantes a analizar es la dureza, es así como se puede determinar que, en la mayoría de los casos, independientemente del proceso de soldadura aplicado, la dureza en la junta luego de aplicar el proceso se incrementa, ya que, durante el tendrá lugar la precipitación de Cr_2N y de fase sigma (σ) que como se dijo anteriormente, se caracteriza por ser un intermetálico duro y frágil. Una alta presencia de estos precipitados puede provocar que la pieza supere la dureza solicitada y presente una fractura frágil durante su funcionamiento.

Por el contrario a lo mencionado anteriormente referente al comportamiento de las propiedades mecánicas, el proceso SMAW en DSS 2205 estudiado por Verma et al. en el 2017, mostró que estas disminuyen luego de aplicar el proceso de soldadura ya que, durante la investigación los autores emplearon una soldadura disímil entre DSS 2205 y ASS 316L. En la figura 3 se muestran las curvas esfuerzo-deformación de estos dos aceros, el metal base (BM) DSS 2205 (curva azul) presentan mayores propiedades mecánicas que el BM ASS 316L (curva rosa). Las curvas roja y negra hacen referencia al acero soldado obtenido, estas muestran mayores propiedades que el acero ASS 316L, pero menores que el DSS 2205. Se observa también, que en efecto, la entrada de calor es importante en el cambio de las propiedades mecánicas pues con una menor entrada de calor (curva roja) se obtienen mayores propiedades que al usar una elevada entrada de calor (curva negra).

EFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

Figura 3.*Curva esfuerzo deformación*

Nota. Adaptado de (Verma et al., 2017)

Los cambios en las propiedades mecánicas pueden provocar fallas a futuro en las piezas a nivel industrial, un aumento en la medida de las propiedades no siempre significa que la pieza posea mejores propiedades mecánicas ya que todo va a depender de los requerimientos que tenga la pieza para cumplir con su función. Sin embargo, es importante continuar con las investigaciones sobre la variación de las propiedades mecánicas analizando la influencia de otros factores.

5. Conclusiones

- El estudio de los procesos de soldadura empleados en DSS determinó que GTAW, SMAW y FCAW son los procesos más usados en la industria gracias a su amplia aplicabilidad a pesar de requerir mayor energía y ser más susceptibles a la precipitación de fases secundarias. Gracias a su versatilidad y buen desempeño el proceso GTAW es el más indicado para usar en la industria, ya que no requiere emplear metal de aporte, se pueden unir piezas pequeñas, se aplica a aleaciones ferrosas, no ferrosas y permite un buen manejo de las variables haciendo más fácil controlar el balance de las fases ferrita (α) y austenita (γ).
- Luego de aplicar algunos procesos de soldadura, se encuentran precipitados como nitruros de cromo (Cr_2N) y la fase sigma (σ), los estudios consultados establecieron que la velocidad de enfriamiento es un factor importante para controlar su formación; el primero se genera por la rápida velocidad de enfriamiento, puesto que disminuye la formación de austenita y esta es la encargada de solubilizar el Nitrógeno (N), mientras el segundo se caracteriza por ser un intermetálico duro y frágil compuesto por Cr, Mo y Si que se da por la reacción eutectoide de la fase δ -ferrita $\Leftrightarrow \sigma + \gamma_2$ y se puede limitar su precipitación con una baja velocidad de enfriamiento.
- Se encontró que las propiedades mecánicas como el límite elástico, la resistencia a la tracción y la dureza tienen una tendencia a incrementar luego de aplicar el proceso de soldadura, debido al aumento en el contenido de Cr que promueve la precipitación de Cr_2N y fase sigma σ , provocando un endurecimiento por solución sólida, disminuyendo la movilidad de las dislocaciones y por ende reduciendo la ductilidad del material. Por otra parte, la tenacidad de las piezas disminuye por el desbalance de las fases ferrita (α) y austenita (γ) que componen los DSS, pues un aumento en la fase austenítica provoca fragilidad en la junta soldada, ya que ésta al ser más dura que la ferrita no posee gran capacidad de absorber energía en el impacto, siendo más

EFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

susceptible a la formación de discontinuidades como grietas que pueden llevar a una pérdida total de la pieza, sin embargo algunos autores recomendaron conservar un mínimo del 25% de austenita en la matriz bifásica para preservar las características del DSS.

Referencias

- Abra-arzola, J. L., García-rentería, M. A., Cruz-hernández, V. L., & García-guerra, J. (2018). Study of the effect of sigma phase precipitation on the sliding wear and corrosion behaviour of duplex stainless steel AISI 2205. *Wear*, 400–401(December 2017), 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.12.019>
- A Hosseini, V., Hurtig, K., Eyzop, D., Östberg, A., Janiak, P., & Karlsson, L. (2019). Ferrite content measurement in super duplex stainless steel welds. *Welding in the World*, 63(2), 551–563. <https://doi.org/10.1007/s40194-018-00681-1>
- Ahmed, A. N., Noor, C. W. M., Allawi, M. F., & El-Shafie, A. (2018). RBF-NN-based model for prediction of weld bead geometry in Shielded Metal Arc Welding (SMAW). *Neural Computing and Applications*, 29(3), 889–899. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2496-0>
- Amiri, E., Ostovan, F., Toozandehjani, M., Shafiei, E., & Mohamed, I. F. (2021). Study and selection of most appropriate filler rod for GTAW of S32750 super duplex steel joints: A comprehensive study on microstructural, mechanical and corrosion properties. *Materials Chemistry and Physics*, 270(October 2020), 124839. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124839>
- Aracil, M. (2018). Welding and cutting of stainless steels. In *Corrosion* (Vol. 1). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-052351-4.50035-2>
- Asif, M. M., Shrikrishna, K. A., & Sathiya, P. (2016). Optimization of process parameters of friction welding of UNS S31803 duplex stainless steels joints. *Advances in Manufacturing*,

EFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

4(1), 55–65. <https://doi.org/10.1007/s40436-015-0130-5>

Badji, R., Bouabdallah, M., Bacroix, B., Kahloun, C., Belkessa, B., & Maza, H. (2008). Phase transformation and mechanical behavior in annealed 2205 duplex stainless steel welds. *Materials Characterization*, 59(4), 447–453. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2007.03.004>

Baghdadchi, A., Hosseini, V. A., Hurtig, K., & Karlsson, L. (2021). Promoting austenite formation in laser welding of duplex stainless steel—impact of shielding gas and laser reheating. *Welding in the World*, 65(3), 499–511. <https://doi.org/10.1007/s40194-020-01026-7>

Bharathi, R. S., Shanmugam, N. S., Kannan, R. M., & Vendan, S. A. (2018). Studies on the Parametric Effects of Plasma Arc Welding of 2205 Duplex Stainless Steel. *High Temperature Materials and Processes*, 37(3), 219–232. <https://doi.org/10.1515/htmp-2016-0087>

Bunaziv, I., Dørum, C., Nielsen, S. E., Suikkanen, P., Ren, X., Nyhus, B., Eriksson, M., & Akselsen, O. M. (2020). Laser-arc hybrid welding of 12- and 15-mm thick structural steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(5–6), 2649–2669. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05192-2>

Chaudhari, A. N., Dixit, K., Bhatia, G. S., Singh, B., Singhal, P., & Saxena, K. K. (2019). Welding behaviour of duplex stainless Steel AISI 2205: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 18, 2731–2737. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.136>

Da Cruz Junior, E. J., Gallego, J., Settimi, A. G., Gennari, C., Zambon, A., & Ventrella, V. A. (2021). Influence of Nickel on the Microstructure, Mechanical Properties, and Corrosion Resistance of Laser-Welded Super-Duplex Stainless Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(4), 3024–3032. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05590-x>

EFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

- Dandekar, T. R., Gupta, A., Kumar, A., Khatirkar, R. K., & Vadavadagi, B. (2018). Shielded metal arc welding of UNS S32750 steel: Microstructure, mechanical properties and corrosion behaviour. *Materials Research Express*, 5(10). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aad99a>
- De Souza, D. D. B. G., & Vilarinho, L. O. (2020). Influence of present phases in corrosion and mechanical behavior of UNS S31803 duplex stainless steel welded by conventional short circuit MIG/MAG process. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 11244–11254. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.026>
- Del Abra-Arzola, J. L., García-Rentería, M. A., Cruz-Hernández, V. L., García-Guerra, J., Martínez-Landeros, V. H., Falcón-Franco, L. A., & Curiel-López, F. F. (2018). Study of the effect of sigma phase precipitation on the sliding wear and corrosion behaviour of duplex stainless steel AISI 2205. *Wear*, 400–401(August 2017), 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.12.019>
- Devendranath Ramkumar, K., Kumar, P. S. G., Sai Radhakrishna, V., Kothari, K., Sridhar, R., Arivazhagan, N., & Kuppan, P. (2015). Studies on microstructure and mechanical properties of keyhole mode Nd:YAG laser welded Inconel 625 and duplex stainless steel, SAF 2205. *Journal of Materials Research*, 30(21), 3288–3298. <https://doi.org/10.1557/jmr.2015.276>
- Emami, S., Saeid, T., & Khosroshahi, R. A. (2018). Microstructural evolution of friction stir welded SAF 2205 duplex stainless steel. *Journal of Alloys and Compounds*, 739, 678–689. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.310>
- Gao, S., Geng, S., Jiang, P., Mi, G., Han, C., & Ren, L. (2021). Numerical analysis of the deformation behavior of 2205 duplex stainless steel TIG weld joint based on the

EFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

- microstructure and micro-mechanical properties. *Materials Science and Engineering A*, 815(September 2020), 141303. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141303>
- Ghosal, S., & Chaki, S. (2010). Estimation and optimization of depth of penetration in hybrid CO₂ LASER-MIG welding using ANN-optimization hybrid model. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47(9–12), 1149–1157. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2234-1>
- Ghosh, A., Misra, D., & Acharyya, S. K. (2019). Experimental and Numerical Investigation on Laser Welding of 2205 Duplex Stainless Steel. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 6(3), 228–246. <https://doi.org/10.1007/s40516-019-00090-2>
- Groth, A., Schedin, E., Sun, C. C., He, H., & Guan, L. (2017). Forta FDX 27 - Duplex stainless steel for high strength gasket plate heat exchangers. *Journal of Physics: Conference Series*, 896(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/896/1/012013>
- Gualco, A., Svoboda, H., & Surian, E. (2014). Efecto de los parámetros de soldadura sobre la microestructura de recargues nanoestructurados base hierro depositados. *Soldagem & Inspeção*, 19, 314–322. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI1904.04>
- Gupta, A., Kumar, A., Baskaran, T., Arya, S. B., & Khatirkar, R. K. (2018). Effect of Heat Input on Microstructure and Corrosion Behavior of Duplex Stainless Steel Shielded Metal Arc Welds. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 71(7), 1595–1606. <https://doi.org/10.1007/s12666-018-1294-z>
- Iacoviello, F., Di Cocco, V., & Franzese, E. (2018). Chemical composition and heat treatment influence on duplex stainless steels fatigue crack propagation resistance. *Strength, Fracture*

EFFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

and Complexity, 11(2–3), 253–263. <https://doi.org/10.3233/SFC-180226>

Jacob, A., Domain, C., Adjanor, G., Todeschini, P., & Povoden-Karadeniz, E. (2020).

Thermodynamic modeling of G-phase and assessment of phase stabilities in reactor pressure vessel steels and cast duplex stainless steels. *Journal of Nuclear Materials*, 533. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152091>

Jenney, C. L., & O'Brien, A. (2001). Welding Handbook, Welding Science & Technology. In Cynthia L. Jenney & A. O'Brien (Eds.), AWS (9th ed., Vol. 1).

Jia, Z., Zhao, Y., Dong, C., Miao, S., Wang, C., & Yi, Y. (2019). The influence of welding speed on friction stir welded of duplex stainless steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 677(2), 0–7. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/677/2/022124>

Kang, D. H., & Lee, H. W. (2012). Effect of different chromium additions on the microstructure and mechanical properties of multipass weld joint of duplex stainless steel. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 43(12), 4678–4687. <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1310-6>

Kik, T., & Górka, J. (2019). Numerical simulations of laser and hybrid S700MC T-joint welding. *Materials*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/ma12030516>

Kim, D. C., Ogura, T., Yamashita, S., Oikawa, Y., & Saida, K. (2020). Computer prediction of α/γ phase fraction in multi-pass weld of duplex stainless steel and microstructural improvement welding process. *Materials and Design*, 196, 109154. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109154>

EFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

- Kim, N. hoon, Gil, W., Lim, H. dae, Choi, C. hyeon, & Lee, H. woo. (2019). Variation of Mechanical Properties and Corrosion Properties with Mo Contents of Hyper Duplex Stainless-Steel Welds. *Metals and Materials International*, 25(1), 193–206. <https://doi.org/10.1007/s12540-018-0166-8>
- Köhler, M. L., Kunz, J., Herzog, S., Kaletsch, A., & Broeckmann, C. (2021). Microstructure analysis of novel LPBF-processed duplex stainless steels correlated to their mechanical and corrosion properties. *Materials Science and Engineering A*, 801(September 2020). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140432>
- Kotecki, D. J. (2010). Some pitfalls in welding of duplex stainless steels. *Soldagem & Inspeção*, 15(4), 336–343. <https://doi.org/10.1590/s0104-92242010000400011>
- Küçüköner, H., Karakoç, H., & Kahraman, N. (2020). Investigation of microstructure and mechanical properties of AISI2205/DIN-P355GH steel joint by submerged arc welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 59(August), 566–586. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.10.023>
- Landowski, M. (2019). Influence of Parameters of Laser Beam Welding on Structure of 2205 Duplex Stainless Steel. *Advances in Materials Science*, 19(1), 21–31. <https://doi.org/10.2478/adms-2019-0002>
- Li, T., Zhang, Y., Gao, L., & Zhang, Y. (2018). Optimization of FCAW parameters for ferrite content in 2205 DSS welds based on the taguchi design method. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/7950607>
- Luchtenberg, P., de Campos, P. T., Soares, P., Laurindo, C. A. H., Maranho, O., & Torres, R. D.

EFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

- (2019). Effect of welding energy on the corrosion and tribological properties of duplex stainless-steel weld overlay deposited by GMAW/CMT process. *Surface and Coatings Technology*, 375(July), 688–693. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.07.072>
- Ma, C. Y., Zhou, L., Zhang, R. X., Li, D. G., Shu, F. Y., Song, X. G., & Zhao, Y. Q. (2020). Enhancement in mechanical properties and corrosion resistance of 2507 duplex stainless steel via friction stir processing. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 8296–8305. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.057>
- Ma, L., Hu, S., & Shen, J. (2017). Microstructure, Properties and Weldability of Duplex Stainless Steel 2101. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(1), 250–257. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2428-2>
- Manoj Samson, R., Deepan Bharathi Kannan, T., Aravind, R., & Varun Vinayak, A. B. (2020). Optimization of process parameters in friction welding of super duplex stainless steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 912(3), 0–11. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/912/3/032018>
- Marques, I. J., Da Silva, F. J., De França, T. S., de Sousa, G. G., Da Conceição Hermenegildo, T. F., & De Abreu Santos, T. F. (2020). Evaluation of abrasive wear in UNS S32101 and S32750 duplex stainless steels submitted to friction stir processing. *Materials Research*, 22, 1–12. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-0877>
- Marques, I. J., Silva, F. J., & Santos, T. F. A. (2020). Rapid precipitation of intermetallic phases during isothermal treatment of duplex stainless-steel joints produced by friction stir welding. *Journal of Alloys and Compounds*, 820, 153170.

EFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153170>

Meinhardt, C. P., Chludzinski, M., Ribeiro, R. F., Rocha, C. L. F., Santos, A. C. S., & Strohaecker, T. R. (2017). Evaluation of friction hydro-pillar processing welding in duplex stainless steels (UNS S31803). *Journal of Materials Processing Technology*, 246, 158–166.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.03.010>

Migiakis, K., Daniolos, N., & Papadimitriou, G. D. (2010). Plasma keyhole welding of uns s32760 super duplex stainless steel: Microstructure and mechanical properties. *Materials and Manufacturing Processes*, 25(7), 598–605.
<https://doi.org/10.1080/10426910903179955>

Mondal, S., Nandi, G., & Pal, P. K. (2021). Parametric optimization of TIG welding of duplex stainless steel without filler rod by PCA method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1017(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1017/1/012007>

Murugan, N., & Kannan, T. (2007). Effects of flux cored arc welding parameters on pitting corrosion resistance of duplex stainless steel clad metals. *Corrosion Engineering Science and Technology*, 42(1), 29–35. <https://doi.org/10.1179/174327807X159952>

Nigon, G. N., Burkan Isgor, O., & Pasebani, S. (2021). The effect of annealing on the selective laser melting of 2205 duplex stainless steel: Microstructure, grain orientation, and manufacturing challenges. *Optics and Laser Technology*, 134(September 2020), 106643.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106643>

Ozlati, A., & Movahedi, M. (2018). Effect of welding heat-input on tensile strength and fracture location in upset resistance weld of martensitic stainless steel to duplex stainless steel rods. *Journal of Manufacturing Processes*, 35(July), 517–525.

EFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.039>

Pan, M., Zhang, X., Chen, P., Su, X. Bin, & Misra, R. D. K. (2020). The effect of chemical composition and annealing condition on the microstructure and tensile properties of a resource-saving duplex stainless steel. *Materials Science and Engineering A*, 788(April), 139540. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139540>

Paulraj, P., & Garg, R. (2015). Effect of welding parameters on mechanical properties of GTAW of UNS S31803 and UNS S32750 weldments. *Manufacturing Review*, 2. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2015032>

Piccini, J. M., & Svoboda, H. G. (2017). Efecto de la velocidad de rotación y la indentación en soldadura de punto por fricción agitación de aleaciones de aluminio disimilares. *Revista de Metalurgia*, 53(1), 1–13. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.090>

Rajput, S. K., Kumar, A., Tripathi, S. S., & Sachan, E. (2019). Investigation of microstructural behavior and mechanical properties of dissimilar weld joints of austenitic-ferritic stainless steel. *Materials Today: Proceedings*, 25, 778–784. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.018>

Reyes, D., Manzano, A., Encinas, A., Sánchez, V. M., de Jesús, M., García, R., Orozco, G., & Olivares, J. M. (2017). Addition of nitrogen to GTAW welding duplex steel 2205 and its effect on fatigue strength and corrosion. *Fuel*, 198, 165–169. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.01.008>

Salvador, C. F., & Antunes, R. A. (2016). FCAW repair welding cycles, HAZ microstructure and corrosion resistance of 2304 duplex stainless steel. *Corrosion Engineering Science and*

EFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

Technology, 51(8), 573–580. <https://doi.org/10.1080/1478422X.2016.1166706>

Santos, T. F. de A., Torres, E. A., & Ramirez, A. J. (2018). Friction stir welding of duplex stainless steels. *Welding International*, 32(2), 103–111. <https://doi.org/10.1080/09507116.2017.1347323>

Saravanan, S., Sivagurumanikandan, N., & Raghukandan, K. (2020). Effect of process parameters in microstructural and mechanical properties of Nd: YAG laser welded super duplex stainless steel. *Materials Today: Proceedings*, xxxx, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.101>

Sathish Kumar, G., Saravanan, S., Balan, A. V., Oscar, J., Ragunath, R., & Ramesh, M. (2020). Influence of FCAW process parameters in super duplex stainless steel claddings. *Materials Today: Proceedings*, 21, 63–65. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.362>

Shin, J. K., Jang, H. J., Cho, K. W., & Park, C. J. (2013). Effects of sigma and chi phases on the localized corrosion resistance of SR50A super austenitic stainless steel. *Corrosion*, 69(4), 364–371. <https://doi.org/10.5006/0723>

Shokri, V., Sadeghi, A., & Sadeghi, M. H. (2017). Materials Science & Engineering A Effect of friction stir welding parameters on microstructure and mechanical properties of DSS – Cu joints. *Materials Science & Engineering A*, 693(March), 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.03.054>

Shunmugam, M. S., & Kanthababu, M. (2018). Advances in Micro and Nano Manufacturing and Surface Engineering. In *Editors Proceedings of AIMTDR*.

EFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

<http://www.springer.com/series/15734>

- Sieurin, H., & Sandström, R. (2007). Sigma phase precipitation in duplex stainless steel 2205. *Materials Science and Engineering A*, 444(1–2), 271–276. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.08.107>
- Silva, D. D. S., Raimundo, R. A., Torquato, R. A., Faria, G. L., Morales, M. A., Simões, T. A., & Gomes, R. M. (2020). Low-field magnetic analysis for sigma phase embrittlement monitoring in thermally aged 22Cr duplex stainless steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 513(March), 167072. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.167072>
- Singh, J., & Shahi, A. S. (2019). Metallurgical, impact and fatigue performance of electron beam welded duplex stainless steel joints. *Journal of Materials Processing Technology*, 272(November 2018), 137–148. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.05.010>
- Singh, R. (2012). Welding metallurgy and welding processes. In *Applied welding engineering: processes, codes and standards* (pp. 143–170).
- Sulaiman, S. A., Abdullah, B., Alias, S. K., Ahmad, N. N., & Aziz, M. N. A. (2020). Investigation of corrosion rate for different type of welding joints using shielded metal arc welding (SMAW). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 834(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/834/1/012055>
- Taban, E., & Kaluc, E. (2011). Welding behaviour of duplex and superduplex stainless steels using laser and plasma arc welding processes. *Welding in the World*, 55(7–8), 48–57. <https://doi.org/10.1007/BF03321307>

EFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

- Taban, E. (2008). Joining of duplex stainless steel by plasma arc, TIG, and plasma arc+TIG welding processes. *Materials and Manufacturing Processes*, 23(8), 871–878. <https://doi.org/10.1080/10426910802385075>
- Tan, H., Wang, Z., Jiang, Y., Han, D., Hong, J., Chen, L., Jiang, L., & Li, J. (2011). Annealing temperature effect on the pitting corrosion resistance of plasma arc welded joints of duplex stainless steel UNS S32304 in 1.0M NaCl. *Corrosion Science*, 53(6), 2191–2200. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.02.041>
- Tasalloti, H., Kah, P., & Martikainen, J. (2017). Effect of heat input on dissimilar welds of ultra-high strength steel and duplex stainless steel: Microstructural and compositional analysis. *Materials Characterization*, 123, 29–41. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.11.014>
- Tian, Y., Lin, S., Ko, J. Y. P., Lienert, U., Borgenstam, A., & Hedström, P. (2018). Micromechanics and microstructure evolution during in situ uniaxial tensile loading of TRIP-assisted duplex stainless steels. *Materials Science and Engineering A*, 734(July), 281–290. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.07.040>
- Udayakumar, T., Raja, K., Afsal Husain, T. M., & Sathiya, P. (2014). Prediction and optimization of friction welding parameters for super duplex stainless steel (UNS S32760) joints. *Materials and Design*, 53, 226–235. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.002>
- Valiente Bermejo, M. A., Thalavai Pandian, K., Axelsson, B., Harati, E., Kisielawicz, A., & Karlsson, L. (2021). Microstructure of laser metal deposited duplex stainless steel: Influence of shielding gas and heat treatment. *Welding in the World*, 65(3), 525–541. <https://doi.org/10.1007/s40194-020-01036-5>

EFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

- Verma, J., & Taiwade, R. V. (2017). Effect of welding processes and conditions on the microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of duplex stainless steel weldments—A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 25, 134–152. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.11.003>
- Verma, J., Taiwade, R. V., Khatirkar, R. K., Sapate, S. G., & Gaikwad, A. D. (2017). Microstructure, Mechanical and Intergranular Corrosion Behavior of Dissimilar DSS 2205 and ASS 316L Shielded Metal Arc Welds. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 70(1), 225–237. <https://doi.org/10.1007/s12666-016-0878-8>
- Wang, W., Hu, Y., Zhang, M., & Zhao, H. (2020). Microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds in austenitic-duplex stainless steels. *Materials Science and Engineering A*, 787(August 2019). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139499>
- Westin, E. M., Johansson, M. M., Bylund, L. A., & Pettersson, R. F. A. (2014). Effect on microstructure and properties of super duplex stainless steel welds when using backing gas containing nitrogen and hydrogen. *Welding in the World*, 58(3), 347–354. <https://doi.org/10.1007/s40194-014-0120-4>
- Xie, X. fang, Li, J., Jiang, W., Dong, Z., Tu, S. T., Zhai, X., & Zhao, X. (2020). Nonhomogeneous microstructure formation and its role on tensile and fatigue performance of duplex stainless steel 2205 multi-pass weld joints. *Materials Science and Engineering A*, 786(March), 139426. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139426>
- Yousefieh, M., Shamanian, M., & Saatchi, A. (2011). Influence of Heat Input in Pulsed Current GTAW Process on Microstructure and Corrosion Resistance of Duplex Stainless Steel Welds.

EFECTO DE LA SOLDADURA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE DSS

Journal of Iron and Steel Research International, 18(9), 65–69.

[https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60036-3](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60036-3)

Yuan, H. X., Wang, Y. Q., Shi, Y. J., & Gardner, L. (2014). Residual stress distributions in welded stainless steel sections. *Thin-Walled Structures*, 79, 38–51.

<https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.01.022>

Zhang, W. W., Cong, S., Luo, S. B., & Fang, J. H. (2018). Effects of Energy Density and Shielding Medium on Performance of Laser Beam Welding (LBW) Joints on SAF2205 Duplex Stainless Steel. *Jom*, 70(8), 1554–1559. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-2872-6>

Zhang, Y., Cheng, S., Wu, S., & Cheng, F. (2020). The evolution of microstructure and intergranular corrosion resistance of duplex stainless-steel joint in multi-pass welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 277(October 2019), 116471. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116471>

Zhang, Z., Jing, H., Xu, L., Han, Y., Zhao, L., & Zhang, J. (2017). Influence of microstructure and elemental partitioning on pitting corrosion resistance of duplex stainless steel welding joints. *Applied Surface Science*, 394, 297–314. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.10.047>

Zhang, Z., Jing, H., Xu, L., Han, Y., & Zhao, L. (2016). Investigation on microstructure evolution and properties of duplex stainless steel joint multi-pass welded by using different methods. *Materials and Design*, 109, 670–685. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.110>