MEMORIA FINAL

PROYECTO:

ADICIÓN DE NITRÓGENO A GASES DE PROTECCIÓN CONVENCIONALES PARA CONTROLAR LAS UNIONES SOLDADAS DE ACEROS INOXIDABLES ALEADOS CON NITRÓGENO.

RAMÓN SANTOS RODRÍGUEZ (CENIM)

MEMORIA FINAL

PROYECTO

ADICIÓN DE NITRÓGENO A GASES DE PROTECCIÓN CONVENCIONALES PARA CONTROLAR LAS UNIONES SOLDADAS DE ACEROS INOXIDABLES ALEADOS CON NITRÓGENO.

1.- INTRODUCCIÓN

La utilización del nitrógeno como elemento de aleación en los aceros inoxidables comporta importantes ventajas tecnológicas y económicas por proporcionar un aumento en la resistencia a la corrosión y en la resistencia mecánica y permitir disminuir su contenido de niquel sin mermar sus propiedades. Por ello se está dedicando un importante esfuerzo al diseño y desarrollo de nuevos aceros inoxidables tales como los superausteníticos, altamente aleados con cromo, molibdeno y nitrógeno que por su elevada resistencia a la corrosión pueden sustituir a las aleaciones base níquel, los aceros dúplex y super-dúplex que, debido a su matriz austenítico-ferrítica, combinan una alta resistencia mecánica con una elevada resistencia al ataque de medios agresivos ofreciendo un gran potencial de utilización en la industria química y papelera y los aceros austeníticos bajos en níquel que podrían llegar a sustituir ventajosamente a los inoxidables austeníticos convencionales.

La aplicación industrial de estos nuevos aceros está siendo dificultada por la carencia de know- how que garantice la realización de uniones soldadas con características similares a las del metal base y una buena reproductibilidad de resultados. Estos problemas surgen principalmente como consecuencia de la pérdida de nitrógeno experimentada durante la fusión del metal base y la posterior conformación del cordón de soldadura lo que da lugar a diferencias entre los contenidos de nitrógeno del metal

depositado y del metal base que pueden originar heterogeneidad microestructural y reducción de propiedades en la junta soldada.

La pérdida de nitrógeno es más acusada en los procedimientos de soldadura por arco bajo protección gaseosa, especialmente en el procedimiento MIG por los niveles de densidad de corriente utilizados y el movimiento del metal fundido en el baño de fusión, por lo que resulta necesario practicar una incorporación exógena de nitrógeno al baño de fusión que compense la cantidad de nitrógeno difundido a la atmósfera durante el proceso de fusión y solidificación del metal fundido. Teóricamente lo más sencillo sería utilizar materiales de aportación similares al metal base con contenidos de nitrógeno superiores pero resulta inviable disponer de la diversidad de varillas-electrodo necesarias para tal fin y, además, en el caso de soldaduras autógenas no quedaría resuelto el problema. La segunda posible vía de incorporación de nitrógeno es la adición al gas de protección del baño de fusión de la cantidad suficiente de nitrógeno capaz de compensar el difundido a la atmósfera durante el proceso de soldadura.

Establecer a priori la proporción correcta de nitrógeno que hay que añadir al gas de protección requeriría conocer previamente los mecanismos de absorción y difusión de este gas en el plasma térmico del arco y en el baño de fusión, así como las posibles interrelaciones existentes entre el nitrógeno, los restantes elementos aleantes del acero y los otros componentes del gas protector. Hasta el momento, aunque han sido realizados algunos trabajos tendentes a identificar los factores determinantes del contenido neto de nitrógeno en la soldadura de algunos aceros duplex y super-austeníticos (1), así como a estudiar las interacciones entre el metal fundido y la columna de plasma (2) y de otros factores relevantes (3), (4) y (5), no existe todavía ninguna base que permita predeterminar tal cantidad. El nitrógeno añadido al gas de protección debe aportar al baño de fusión la cantidad suficiente de este gas para compensar la pérdida de nitrógeno del metal base pero tampoco debe superar demasiado el volumen de pérdidas porque produciría heterogeneidad microestructural entre el metal depositado y el metal base.

Otro importante aspecto a tener en cuenta es la posibilidad de producir alteraciones perjudiciales en la dinámica del baño de fusión como consecuencia de aumentar sustancialmente su contenido de nitrógeno originandose turbulencias, embolsamiento de nitrógeno en metal solidificado y modificaciones en la geometría del baño que tendrían su reflejo en las caracteristicas geometricas y en la compacidad del cordón de

soldadura incidiendo considerablemente sobre la resistencia mecánica y resistencia a la corrosión de la junta soldada.

El trabajo realizado contribuye a resolver la problemática expuesta mediante el estudio de los siguientes aspectos :

- Determinación de la influencia del contenido de nitrógeno en el gas protector sobre la composición microestructural del metal fundido y de la zona afectada térmicamente por el arco de soldadura.
- Análisis del nitrógeno efectivo incorporado al baño de fusión via gas de protección soldando con diferentes niveles de input térmico.
- Estudio de la influencia ejercida por el contenido de nitrógeno en el gas protector sobre la geometría del cordón de soldadura.

2.- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 – MATERIALES

Material Base

Los cordones de soldadura han sido depositados sobre dos aceros inoxidables aleados con nitrógeno y de matriz austenítico-ferrítica. A tal fin fueron elegidos un acero dúplex, grado 2205, y otro superdúplex, grado 2507. El primero tiene un gran potencial de aplicación en la construcción de recipientes a presión, tuberías, tanques e intercambiadores de calor para la industria química y petroquímica y el segundo para aplicaciones offshore y plantas desalinizadoras.

Los aceros fueron manufacturados por Avesta Sheffield y suministrados en planchas rectangulares de 270 X 200 mm, siendo de 6 mm. el espesor del acero 2205 y de 8mm. el del acero 2507 y sus composiciones químicas respectivas fueron :

Acero	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
2205	0,025	0,41	1,51	0,022	0,0002	21,98	5,76	3,08	0,181

		,	-	y~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~			,		
1000	Λ Λ 10	0.00	Δ 41	0.01/	0.001	2000	(^ ^	~ ~ 4	A 40
エフラロチ	+0.01	E (1) 23	1 11 41	111116	1111111	/	694	3 /4	1 1 2 X
2001	10,010	ر سندو ۲	, 0,-1	0,010	0,001	20,20	0,73	J,/T	0,20
1	1 .	,	,	1 1			,	,	,

Tabla I. Composición Química del material base *Material de aportación*

Se seleccionó como material de aporte común para los aceros estudiados, una varilla-electrodo del tipo SG X 2Cr Ni Mo N 2510 (DIN 8556), manufacturada por Esab con el nombre comercial de OK Autrod 16.88, produciendo metal depositado con < 0.020 C - 0.4 Si - 0.4 Mn - 25.0 Cr - 10.0 Ni - 4.0 Mo - 0.25 N.

El diámetro de varilla utilizado fue de 1,2 mm.

Gases de protección

Las soldaduras se realizaron utilizando cuatro gases de protección con base Ar – 30 He y adición de N en diferentes proporciones desde 0 a 10%, según el siguiente esquema :

N %	He %	O %	Ar %
0	30	1	Balance
2,5	30	1	Balance
5	30	1	Balance
10	30	1	Balance

Tabla II. Composición química de los gases de protección utilizados

2.2 – CONDICIONES OPERATIVAS

Procedimiento de soldadura

Las soldaduras han sido realizadas utilizando el procedimiento de soldadura bajo protección gaseosa MIG con fuente de corriente transistorizada con alta linealidad y frecuencia de respuesta para facilitar el control del volumen de metal fundido y con microprocesador incorporado que facilita el control sinérgico del arco (Fig 1). Estas caracteristicas

permiten reducir notablemente perturbaciones incontroladas del proceso tales como inestabilidad del arco por recebado y fluctuaciones en la extensión del electrodo-varilla que enmascararían la influencia del factor a estudiar, a la vez que simplifican el control de los parámetros operativos del proceso.

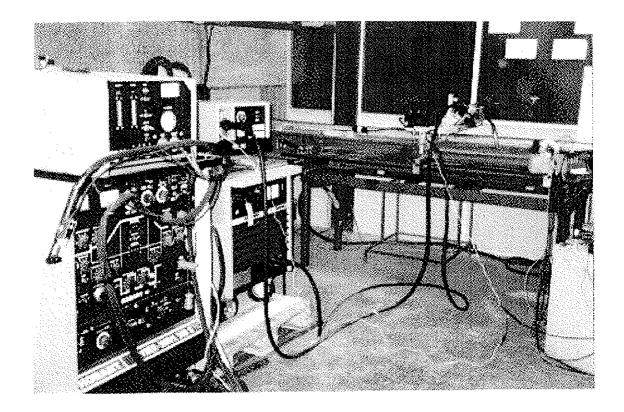


Fig 1.- Vista general del equipamiento utilizado.

Para eliminar la aleatoriedad inducida por el soldador, el equipo MIG fue interconectado a un sistema automatizado que permite mantener constante la longitud del arco de soldadura, inclinación de la pistola y velocidad de avance, así como registrar en tiempo real los parámetros eléctricos del proceso. Las figuras 2 y 3 muestran el sistema mecanizado con control de velocidad de desplazamiento y posicional del arco de soldadura utilizado

en el trabajo y la célula de registro y control de los parámetros eléctricos del procedimiento.

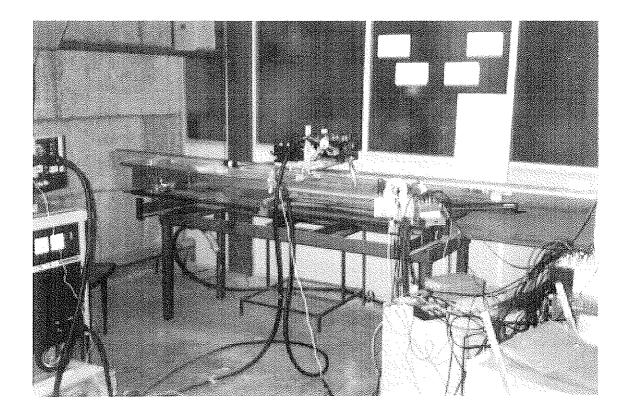


Fig. 2.- Sistema automatizado conectado al equipo de soldadura.

Las soldaduras fueron realizadas en posición horizontal depositando cordones de 200 mm de longitud con diferentes inputs térmicos, siendo preajustados y controlados en tiempo real los parámetros eléctricos para asegurar la regulación del aporte térmico.

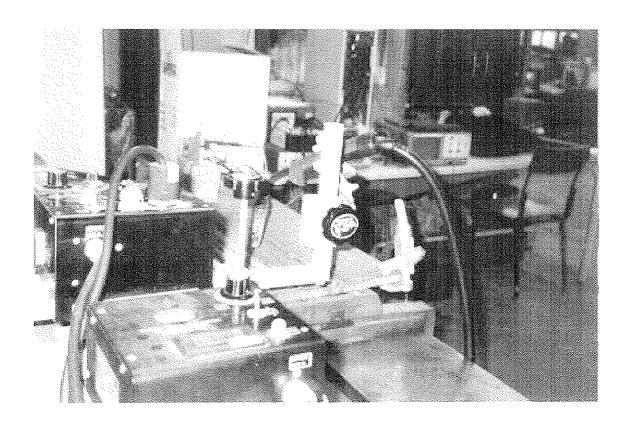


Fig. 3.- Vista del sistema automatizado de soldadura y de control de parámetros eléctricos del arco.

Aporte Térmico

Se depositaron cordones de soldadura sobre cada uno de los materiales base con tres diferentes niveles de input térmico : 0,7 KJ/mm, 1 KJ/mm y 1,2 KJ/mm.

Parámetros de soldadura

Los parámetros de soldadura utilizados con cada material base y cada gas de protección fueron :

Input Térmico	Intensidad de Corriente	Tensión de Arco	Velocidad de Soldeo	Caudal de Gas
0,7 KJ/mm	185 A	25 V	39,5 cm/min	17 l/min
1 KJ/mm	205 A	26 V	32 cm/min	17 l/min
1,2 KJ/mm	250 A	26,8 V	33,5 cm/min	17 l/min

Tabla III.- Condiciones de soldadura empleadas

La asignación de estos valores estuvo fundamentada en la realización de un estudio previo para determinar los niveles de tensión de arco con los que se mantenía un arco de soldadura estable a distintas velocidades de soldeo.

2.3 – CARACTERIZACIÓN DE LAS SOLDADURAS

La caracterización de los cordones de soldadura realizados en las condiciones descritas anteriormente ha consistido en la realización de los siguientes estudios :

Determinación de características geométricas

Todas las soldaduras han sido inspeccionadas visualmente para evaluar su homogeneidad de forma y la presencia de proyecciones y porosidad a lo largo del cordón. Posteriormente se han realizado secciones transversales de cada cordón y han sido determinadas las caracteristicas geométricas de los cordones de soldadura midiendo en las respectivas macrografías la penetración, anchura y sobreespesor de cada sección transversal.

Compacidad

Ha sido evaluada en cada cordón por medio del estudio de la distribución de porosidad en metal depositado y del tamaño máximo de poros en las secciones transversales de los cordones de soldadura.

Determinación de ferrita delta

El contenido de ferrita en metal depositado de cada cordón de soldadura y de la zona afectada térmicamente ha sido medido utilizando el método magnetoscópico con un equipo Forster .

Determinación del contenido de nitrógeno

Ha sido analizado el contenido de nitrógeno de cada soldadura empleando la técnica de fusión en atmósfera de gas inerte con un equipo Leco.

3.- RESULTADOS OBTENIDOS

3.1- INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE NITRÓGENO DEL GAS DE PROTECCIÓN SOBRE LA MICROESTRUCTURA DEL METAL DEPOSITADO

A partir de las mediciones del contenido de ferrita delta realizadas sobre los cordones de soldadura y la zona afectada termicamente ha sido factible realizar una evaluación cuantitativa del efecto ejercido por el nitrógeno añadido al baño de fusión vía el gas de protección sobre el balance austenita – ferrita del metal depositado.

En cada soldadura se registró, utilizando un magnetoscopio Forster, la distribución del contenido de ferrita delta tomando mediciones cada 5 mm a lo largo del centro de cordón y bordes. También fueron registrados cada 20 mm. los valores de ferrita delta moviendo la sonda transversalmente al eje central del cordón.

Los valores de ferrita delta medidos en la zona afectada térmicamente (bordes de cordón), fueron en todas las soldaduras muy similares a los del metal base y las variaciones más significativas se produjeron en las soldaduras realizadas con 10% N2, pero en ningún caso se registró un porcentaje de disminución de ferrita delta superior al 4%, y la variación fue inversamente proporcional al nivel de aporte térmico utilizado.

Las mediciones de ferrita delta realizadas en posiciones transversales al eje de los cordones de soldadura mostraron que en el centro geométrico del cordón se produjo la máxima desviación respecto a los valores de ferrita delta del metal base, obteniendose valores tanto más similares al del metal base cuanto más próximo a los bordes laterales del cordón fuera el punto donde se efectuara la correspondiente medición. Asimismo, y debido seguramente a la diferencia en velocidad de enfriamiento, se registraron en las zonas de iniciación del cordón (áreas de cebado del arco de soldadura) valores de ferrita delta muy diferentes a los del resto del cordón .

Las mediciones efectuadas a lo largo del centro del cordón se realizaron cada 5 mm., pero en el cálculo de los valores medios se desestimaron las mediciones realizadas en las zonas de inicio y cráteres de los cordones de soldadura por la razón expuesta anteriormente. Asimismo no se tuvieron en cuenta, para disminuir en lo posible el fenómeno de aleatoriedad en las medidas, los valores máximo y mínimo obtenidos en el resto del cordón.

Los valores medios de ferrita delta obtenidos en centro de cordones de los dos aceros material base con las condiciones de soldadura utilizadas quedan reflejados en las tablas IV y V, expuestas a continuación :

Input	Gas	Gas	Gas	Gas
KJ/mm	0 % N	2,5 % N	5 % N	10 % N
0,7	45,88	45,57	37	35,04
1	48,31	42,86	35,80	34,68
1,2	44,88	42,27	34,42	28,44

Tabla IV.- Contenido de ferrita delta en los cordones de soldadura depositados en el acero 2205.

Input	Gas	Gas	Gas	Gas
KJ/mm	0 % N	2,5 % N	5 % N	10 % N
0,7	44,73	46,45	40,57	35,54
1	44,54	47,22	35,14	30,69
1,2	44,76	40,80	33,66	26,26

Tabla V.- Contenido de ferrita delta en los cordones de soldadura depositados en el acero 2507.

El contenido de ferrita delta del metal depositado resultó ser dependiente del contenido de nitrógeno existente en el gas de protección y del aporte térmico del arco de soldadura :

El contenido de nitrógeno del gas protector afectó muy significativamente al porcentaje de ferrita delta en el metal depositado para contenidos de nitrógeno superiores al 2,5%. El contenido de ferrita delta disminuye al aumentar el nitrógeno en el gas de protección y este efecto austenizante es más acusado cuanto mayor es el aporte térmico del arco de soldadura.

Los resultados obtenidos muestran reducciones de hasta el 25% de ferrita delta en metal depositado al aumentar el contenido de nitrógeno del gas de protección desde 0 hasta el 10%.

El balance ferritico – austenítico en metal depositado más similar al del metal base se obtuvo en el acero 2205 (ferrita delta = 41) con 2,5% de nitrógeno en gas protector para todos los niveles de aporte térmico. En las soldaduras realizadas en acero 2507 (ferrita delta = 39,3), se obtuvo el balance más similar con adición de 5% de nitrógeno al gas de protección en los cordones depositados con 0,7 KJ/mm y 1 KJ/mm y con adición de un 2,5% de nitrógeno en las soldaduras realizadas con aporte térmico de 1,2 KJ/mm.

3.2- INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE NITRÓGENO DEL GAS DE PROTECCIÓN SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y GEOMÉTRICAS DEL CORDÓN DE SOLDADURA.

Los cordones de soldadura realizados con las condiciones operativas reseñadas en el apartado 2.2, fueron ,en primer lugar, inspeccionados visualmente para analizar su forma, contorno, regularidad, porosidad en metal depositado y volumen de proyecciones de metal fundido.

En las figuras 4 y 5 se presentan fotografiados los cordones depositados sobre el acero 2205 con los tres niveles de aporte térmico del arco de soldadura estudiados y con proporciones del 0% y 2,5% de nitrógeno incorporado al gas de protección (Fig. 4) y 5% y del 10% de nitrógeno incorporado (Fig. 5).

La numeración de los cordones es la siguiente :

All: Cordón depositado con 0,7 KJ/mm y 0% nitrógeno en gas protector

A12: Cordón depositado con 1 KJ/mm y 0% nitrógeno en gas protector

A13 : Cordón depositado con 1,2 KJ/mm y 0% nitrógeno en gas protector

A14: Cordón depositado con 0,7 KJ/mm y 2,5% nitrógeno en gas protector

A15: Cordón depositado con 1 KJ/mm y 2,5% nitrógeno en gas protector

A16: Cordón depositado con 1,2 KJ/mm y 2,5% nitrógeno en gas protector

A27: Cordón depositado con 0,7 KJ/mm y 5% nitrógeno en gas protector

A28: Cordón depositado con 1 KJ/mm y 5% nitrógeno en gas protector

A29 : Cordón depositado con 1,2 KJ/mm y 5% nitrógeno en gas protector

A210: Cordón depositado con 0,7KJ/mm y 10% nitrógeno en gas protector

A211 : Cordón depositado con 1 KJ/mm y 10% nitrógeno en gas protector

A212: Cordón depositado con 1,2KJ/mm y 10% nitrógeno en gas protector

A efectos comparativos se depositó un cordón de soldadura sin protección gaseosa con un aporte térmico de 1,2 KJ/mm. Este cordón está situado en la figura 4 entre el A12 y el A13.

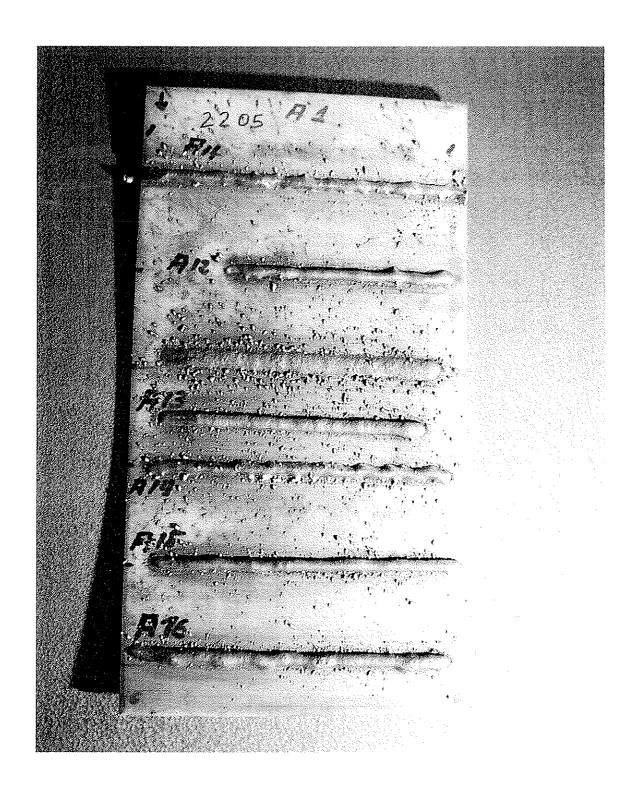


Fig.4.- Soldaduras realizadas en el acero 2205 incorporando nitrógeno al gas de protección en proporciones del 0% y 2,5% .

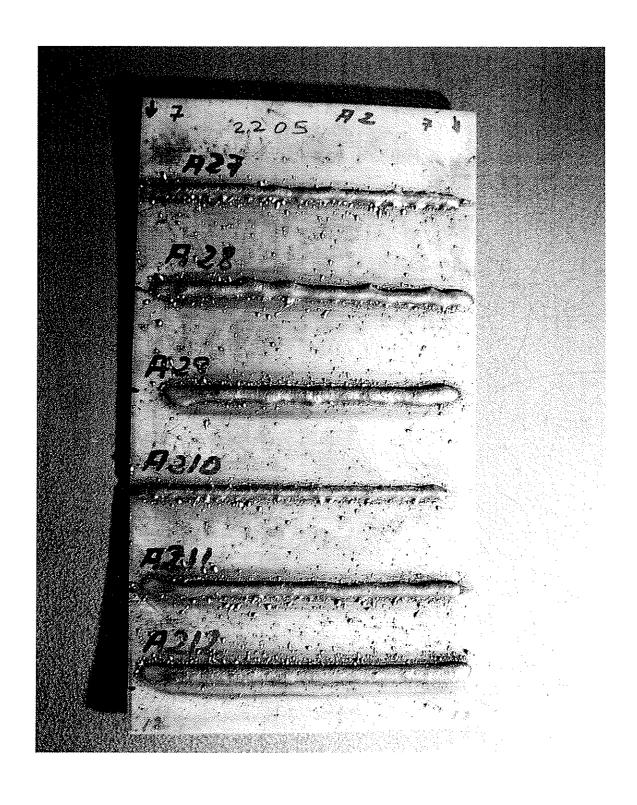


Fig.5.- Soldaduras realizadas en el acero 2205 incorporando nitrógeno al gas de protección en proporciones del 5% y del 10%.

El estudio realizado sobre estos cordones de soldadura demuestra que las características geométricas de las soldaduras y su conformación resultan

dependientes del porcentaje de nitrógeno añadido al gas de protección. Asimismo, su compacidad también está influenciada por la cantidad de nitrógeno existente en la atmósfera protectora del arco de soldadura.

Los principales resultados obtenidos son :

- Los cordones realizados sin adición de nitrógeno al gas protector tienen, para todos los niveles de energía térmica considerados, un ángulo de contacto muy elevado entre la superficie del sobreespesor y la del metal base, siendo, por tanto, muy proclives a la formación de mordeduras.
- El aumento del contenido de nitrógeno en el gas de protección produce, a cualquier nivel de input térmico, un efecto beneficioso sobre la conformación del cordón reduciendo las irregularidades de su contorno y produciendo un ensanchamiento del cordón y una disminución del ángulo de contacto entre superficie del sobreespesor y la del metal base.
- Los cordones de contorno más irregular correspondieron, para cualquier porcentaje de nitrógeno, a los depositados con 0,7 KJ/mm.
- En las soldaduras realizadas con 1 KJ/mm y 1,2 KJ/mm, el incremento de la proporción de nitrógeno en el gas de protección originó un notable ensanchamiento del cordón de soldadura.
- Para cada nivel de nitrógeno en el gas de protección, las soldaduras con mejor contorno y forma se obtuvieron utilizando la mayor energía térmica de arco.
- El cordón más regular en forma y dimensiones fue el obtenido soldando con 1,2 KJ/mm y 10% de nitrógeno en el gas protector.
- El nivel de proyecciones de metal fundido resultó elevado al soldar con inputs térmicos de 0,7 KJ/mm y 1 KJ/mm y se redujo notablemente con energías de 1,2 KJ/mm.
- El contenido de nitrógeno del gas protector no afectó significativamente la cantidad de proyecciones de metal fundido.
- La presencia de porosidad en metal depositado resultó depender en un mayor grado del nivel de energía térmica del arco que del porcentaje de nitrógeno existente en el gas de protección y resultó particularmente

importante en el cordón de soldadura realizado con 1,2 KJ/mm y 10% de nitrógeno.

En las figuras 6 y 7 se muestran los cordones de soldadura depositados sobre el acero 2507 con los tres niveles de aporte térmico considerados y las cuatro proporciones de nitrógeno presentes en el gas protector estudiados. La figura 6 reproduce las soldaduras realizadas con 0%y 2,5% de nitrógeno y la figura 7 las obtenidas con 5% y 10% de nitrógeno.

Los respectivos cordones obtenidos fueron denominados de la siguiente forma :

B11: Cordón depositado con 0,7 KJ/mm y 0% nitrógeno en gas protector B12: Cordón depositado con 1 KJ/mm y 0% nitrógeno en gas protector B13: Cordón depositado con 1,2 KJ/mm y 0% nitrógeno en gas protector B14: Cordón depositado con 0,7 KJ/mm y 2,5% nitrógeno en gas protector B15: Cordón depositado con 1 KJ/mm y 2,5% nitrógeno en gas protector B16: Cordón depositado con 1,2 KJ/mm y 2,5% nitrógeno en gas protector B27: Cordón depositado con 0,7 KJ/mm y 5% nitrógeno en gas protector B28: Cordón depositado con 1 KJ/mm y 5% nitrógeno en gas protector B29: Cordón depositado con 1,2 KJ/mm y 5% nitrógeno en gas protector B210: Cordón depositado con 0,7 KJ/mm y 10% nitrógeno en gas protector B211: Cordón depositado con 1 KJ/mm y 10% nitrógeno en gas protector B212: Cordón depositado con 1,2 KJ/mm y 10% nitrógeno en gas protector B212: Cordón depositado con 1,2 KJ/mm y 10% nitrógeno en gas protector

Sobre estos cordones se practicó el mismo método de inspección reseñado anteriormente para las soldaduras del acero 2205.

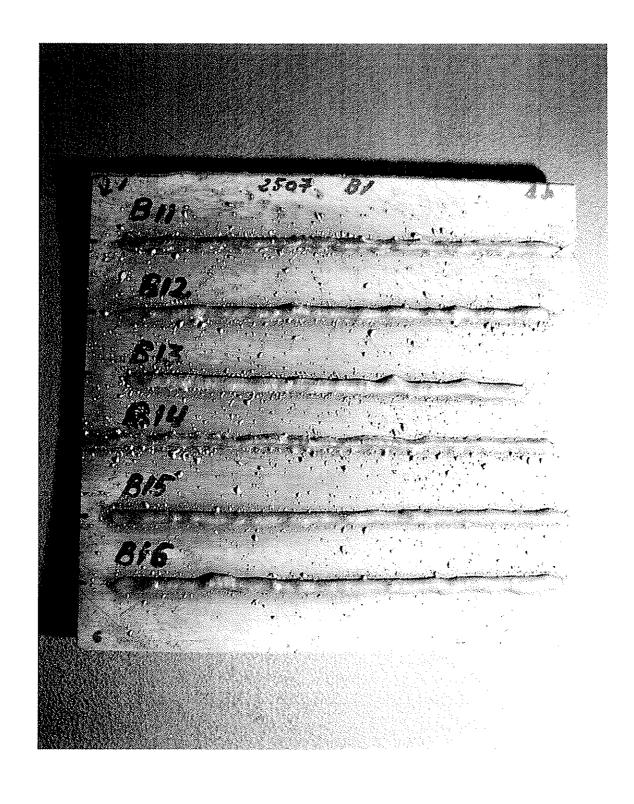


Fig 6.- Soldaduras realizadas en el acero 2507 con 0% y 2,5% de nitrógeno en el gas de protección

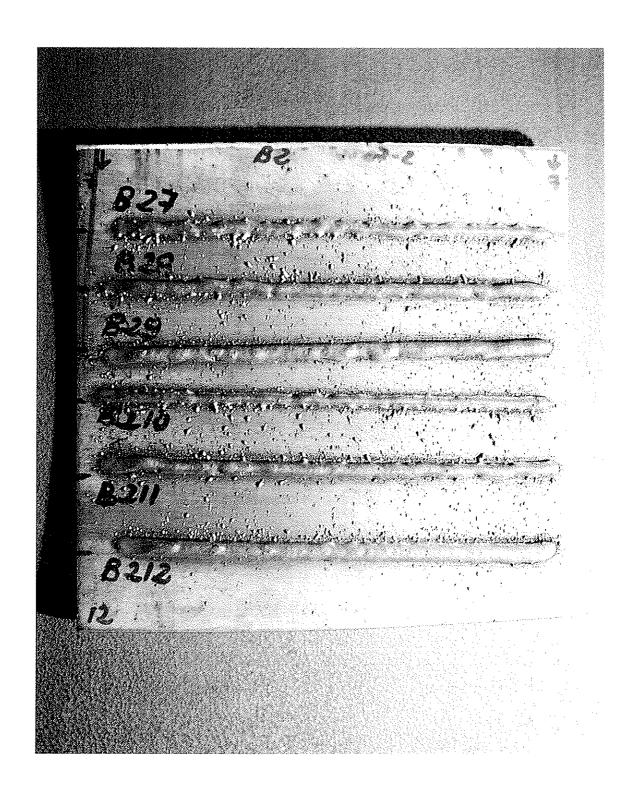


Fig 7.- Soldaduras realizadas en el acero 2507 con 5% y 10% de nitrógeno en el gas de protección

Del análisis de los cordones depositados sobre el acero 2507 se infieren resultados concordantes con los obtenidos en las soldaduras sobre el acero 2205.

Los principales resultados fueron:

- El aumento del contenido de nitrógeno en el gas de protección mejoró la forma del cordón, produciendose un ensanchamiento del mismo y una suavización del ángulo de contacto entre la superficie del sobreespesor y del metal base y reduciendose las irregularidades del contorno de las soldaduras.
- La disminución del contenido de nitrógeno en el gas protector favoreció la presencia de mordeduras en los bordes de cordón.
- Las soldaduras realizadas con un aporte térmico de 0,7 KJ/mm tuvieron un contorno y forma irregulares.
- A todos los niveles de nitrógeno en el gas de protección, el incremento de energía térmica del arco de soldadura favoreció la formación de cordones más regulares y con dimensiones más homogéneas.
- La cantidad de proyecciones de metal fundido resultó ser inversamente proporcional al nivel energético del arco de soldadura.
- La proporción de nitrógeno presente en el gas de protección no afectó significativamente al volumen de proyecciones de metal fundido.
- La existencia de porosidad en el metal fundido aumentó con el incremento de energía térmica del arco y resultó muy apreciable en los cordones realizados con 1,2 KJ/mm, independientemente de la concentración de nitrógeno en el gas de protección.

Las características geométricas de los cordones de soldadura fueron determinadas cuantitativamente a partir de macrografías de secciones transversales de cada cordón sobre las que se midieron, según se representa en la figura 11, la anchura de cordón (W), altura de sobreespesor (P1), penetración en metal base (P2) y altura del metal depositado (P1+P2)

Las figuras 8, 9 y 10 muestran las macrografías de las soldaduras realizadas en el acero 2205 y en las figuras 12, 13 y 14 se representan gráficamente los resultados obtenidos.

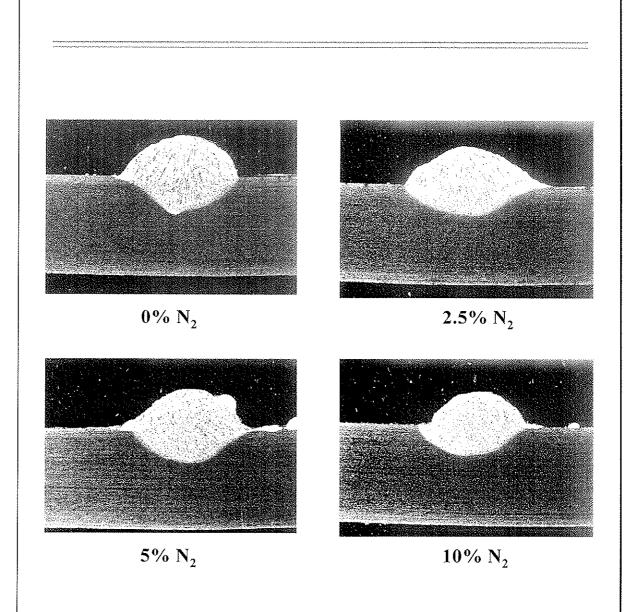


Fig. 8.- Soldaduras con 0,7 KJ/mm en acero 2205

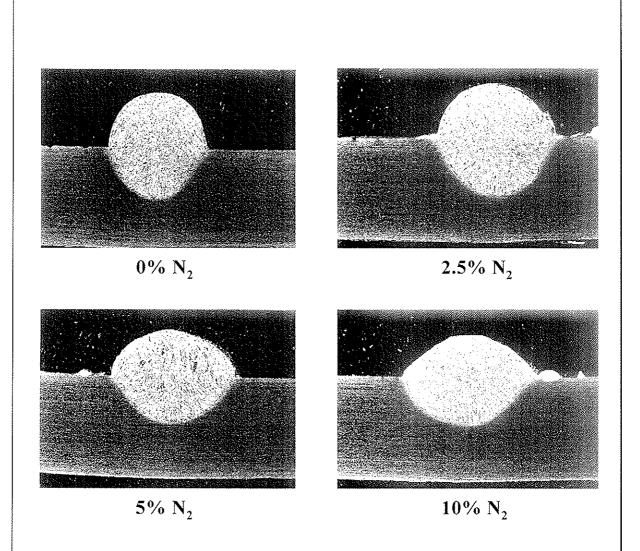


Fig. 9.- Soldaduras con 1 KJ/mm en acero 2205

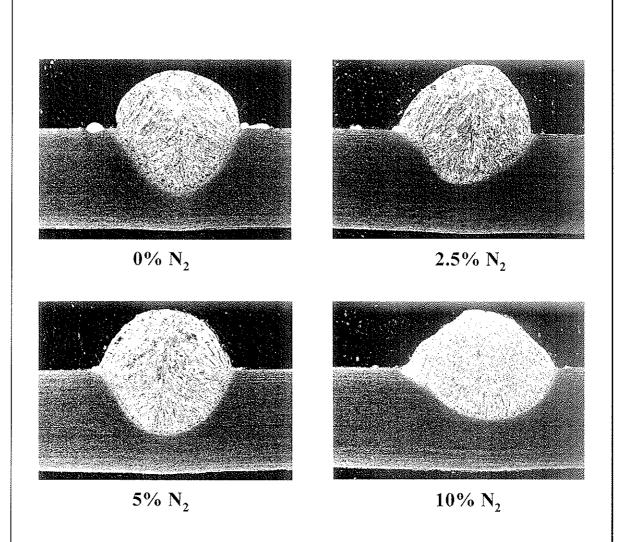


Fig. 10.- Soldaduras con 1,2 KJ/mm en acero 2205

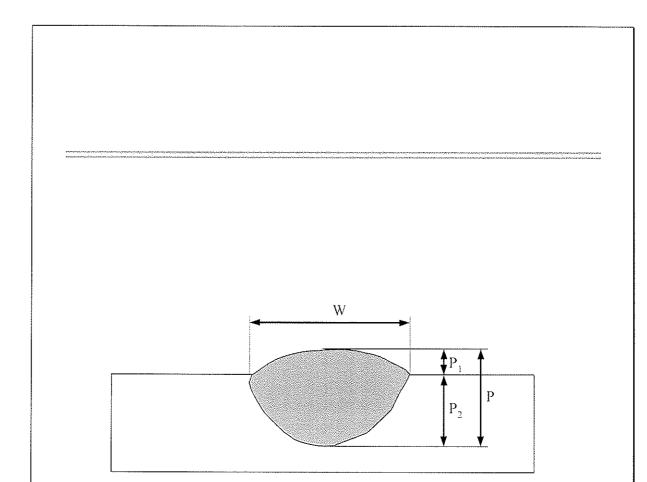


Fig. 11.- Medición de dimensiones del cordón en las macrosecciones de las soldaduras.

Weld Dimensions,	, N ₂ content					
mm	0	2.5	5	10		
W	7.57	9	8	7.29		
\mathbf{P}_1	2.57	2.43	2.43	2.29		
\mathbf{P}_2	2.43	1.86	2.29	1.86		
P	5	4.29	4.72	4.15		

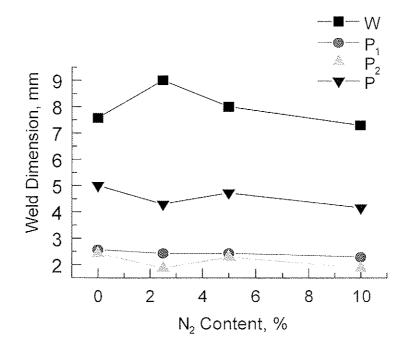


Fig.12.- Dimensiones de las soldaduras realizadas con 0,7 KJ/mm en acero 2205.

Weld Dimensions,	N ₂ content					
mm	0	2.5	5	10		
W	6	6.86	7.43	8.29		
P_1	3.43	3.14	3	2.57		
P_2	3.14	3.71	3	3		
P	6.57	6.85	6	5.57		

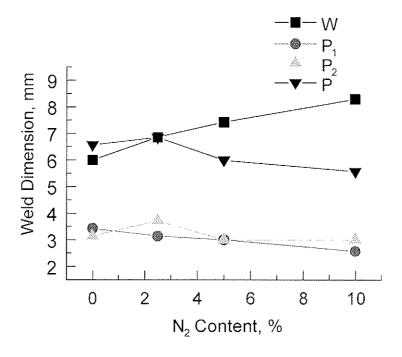


Fig.13. - Dimensiones de las soldaduras realizadas con 1 KJ/mm en acero 2205.

Los resultados obtenidos permiten establecer unas claras tendencias de comportamiento de las características geométricas de los cordones de soldadura al variar la concentración de nitrógeno del gas de protección :

Soldaduras realizadas con 0,7 KJ/mm.

Al aumentar el contenido de nitrógeno del gas protector, la forma del cordón de soldadura fué más regular presentando el área de penetración en el metal base mucho más uniforme a lo largo de toda la sección del cordón. El metal fundido que, sin adición de nitrógeno, solidifica preferentemente sobre la superficie del metal base, se reparte, con adición del 10% de nitrógeno, igualitariamente entre el sobreespesor y la penetración (Fig. 8). El cambio más acusado se experimentó con la adición de 2,5%N: la penetración del cordón dejó de ser puntiaguda para presentar una mayor uniformidad, disminuyendo en altura, asimismo, el área de sobreespesor y extendiendose sobre la superficie del metal base.

Las dimensiones medidas reflejan estos cambios : la anchura del cordón aumentó el 19%, la punta de penetración en el metal base disminuyó el 23% y la altura del metal depositado disminuyó el 15%. (Fig. 12).

Soldaduras realizadas con 1KJ/mm

El aumento del contenido de nitrógeno del gas protector produjo una notable variación en la forma del cordón , cuya sección pasó de tener una forma elíptica con el eje mayor perpendicular a la superficie del metal base (con 0% N), a ser una cuasi- elipse con el eje mayor situado en la superficie del metal base (con 10% N), como puede observarse en la Fig 9. La forma óptima de cordón se obtuvo con 5% de nitrógeno. Las mediciones realizadas mostraron que , al aumentar la proporción de nitrógeno en el gas protector desde 0 hasta el 10%, la anchura del cordón pasó de 6 mm. a 8,29 mm.(incremento del 38%); la penetración se redujo un 25% y la altura del metal depositado un 15%. (Fig. 13).

Soldaduras realizadas con 1,2 KJ/mm

La forma de los cordones no experimentó cambios tan acusados, aunque la tendencia fue análoga. La anchura del cordón aumentó y la penetración disminuyó. (Fig 10). El cordón de proporciones más equilibradas fue el de 5%N.

Al incrementar el nitrógeno desde 0 hasta 10% de nitrógeno, se incrementó la anchura del cordón un 27% y se redujo la penetración el 18%. (Fig. 14).

Weld Dimensions,	s, N ₂ content					
mm -	0	2.5	5	10		
W	7.43	8	8.14	9.43		
P_1	3.07	4.14	3.86	3.57		
P_2	4	3.29	4	3.29		
P	7.57	7.43	7.86	6.86		

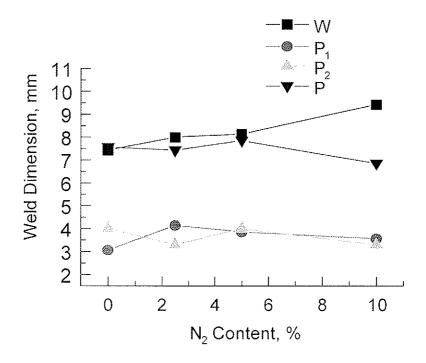


Fig.14.- Dimensiones de las soldaduras realizadas con 1,2 KJ/mm en acero 2205.

Las figuras 15,16 y 17 muestran las macrografías de las soldaduras realizadas con el acero 2507 y las figuras 18, 19 y 20 las dimensiones de los respectivos cordones.

En las soldaduras realizadas con el acero 2507, resultó menos acusada la influencia del contenido de nitrógeno del gas protector sobre la forma y dimensiones de los cordones que en las realizadas con el acero 2205 :

Soldaduras realizadas con 0,7 KJ/mm

La fig 15 muestra que el incremento de la proporción de nitrógeno en el gas protector produjo un aumento de la anchura del cordón y de la penetración en el metal base a costa de una reducción del sobreespesor.

La mayor modificación se produjo con 5% N : la anchura se incrementó en un 20% respecto a la obtenida sin adición de nitrógeno y en un 13% respecto a la obtenida soldando con 2,5% de nitrógeno.

La penetración aumentó en un 17% al pasar de 0% N al 10% N, pero este incremento no fue progresivo, ya que, al incrementar el porcentaje de nitrógeno del 5% al 10% no se experimentó alteración de la penetración, como se observa en la Fig. 18.

Soldaduras realizadas con 1 KJ/mm

La adición de nitrógeno al gas de protección produjo un ligero incremento de la anchura del cordón y una mayor reducción de la penetración en el metal base (Fig 16).

El incremento máximo de anchura no superó el 4% y la disminución máxima de penetración alcanzó el 20%. La altura del sobreespesor disminuyó en un 6%. (Fig. 19).

Soldaduras realizadas con 1,2 KJ/mm

El incremento de nitrógeno en gas protector originó variaciones notables en la forma y dimensiones de los cordones (Fig. 17). Los cordones experimentaron un aumento muy acusado y progresivo en su anchura, acompañado de una correspondiente disminución en sobreespesor y penetración. El incremento de anchura fue del 40%, al pasar desde 0% N hasta 10% N (Fig. 20).

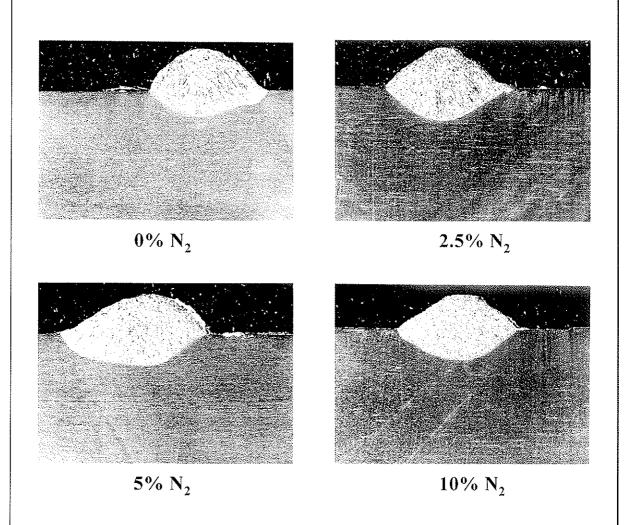


Fig.15.- Soldaduras con 0,7 KJ/mm en acero 2507

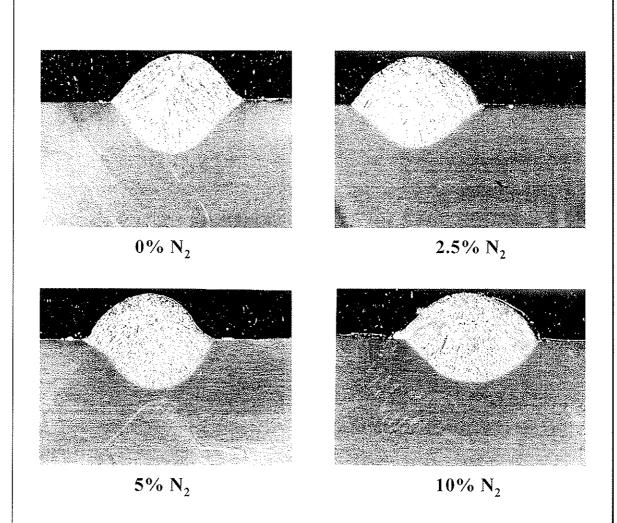


Fig. 16.- Soldaduras con 1KJ/mm en acero 2507

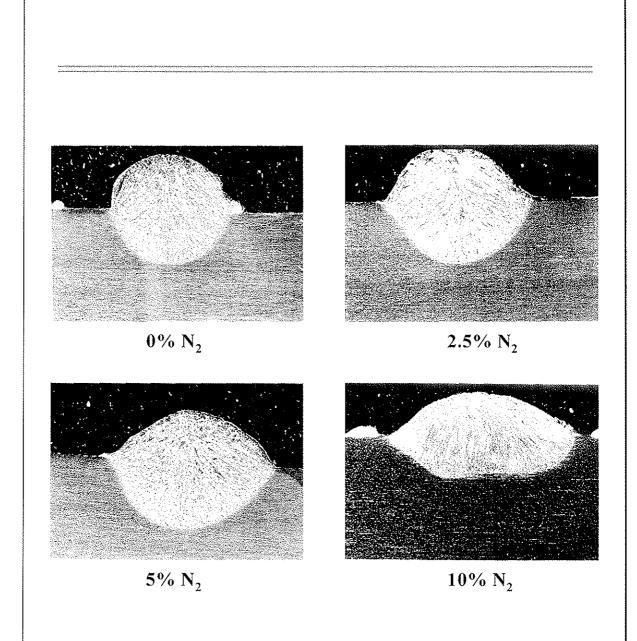


Fig.17.- Soldaduras con 1,2 KJ/mm en acero 2507

Weld Dimensions,	, N ₂ content					
mm -	0	2.5	5	10		
W	7.14	7.57	8.57	7.14		
\mathbf{P}_1	2.71	2.43	2.43	2.14		
P_2	1.71	2.14	2	2		
P	4.42	4.57	4.43	4.14		

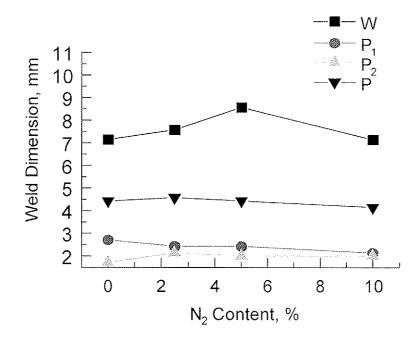


Fig.18.- Dimensiones de las soldaduras realizadas con 0,7 KJ/mm en acero 2507.

Weld Dimensions,	N ₂ content					
mm –	0	2.5	5	10		
W	8	7.86	7.86	8.29		
P_1	3	3	2.86	2.86		
P_2	3.43	2.71	3.14	2.71		
P	6.43	5.71	6	5.57		

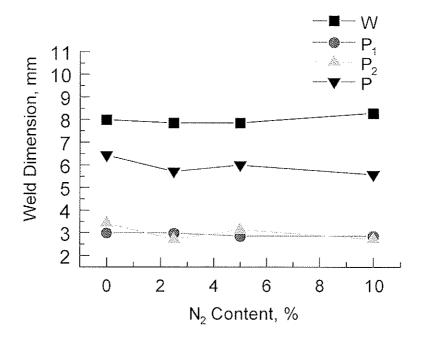


Fig. 19.- Dimensiones de las soldaduras realizadas con 1 KJ/mm en acero 2507.

Weld Dimensions,	s, N ₂ content					
mm -	0	2.5	5	10		
W	8	8.86	10	11.29		
P_1	3.71	3.43	3.29	2.86		
P_2	3.43	4	4.14	2.71		
P	7.14	7.43	7.43	5.57		

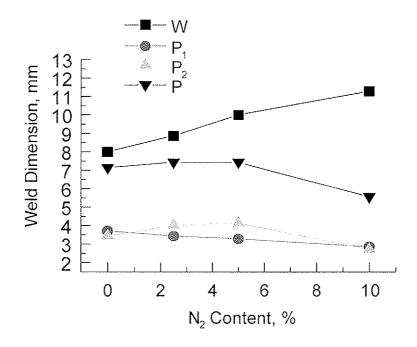


Fig. 20.- Dimensiones de las soldaduras realizadas con 1,2 KJ/mm en acero 2507.

3.3.- INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE NITRÓGENO AL GAS PROTECTOR SOBRE LA INCORPORACIÓN DE NITRÓGENO EN EL METAL DEPOSITADO.

En cada cordón de soldadura se determinó el contenido de nitrógeno efectivo en el metal depositado empleando la técnica analítica de fusión en atmósfera de gas inerte utilizando equipo Leco.

Previamente, se procedió al mecanizado y corte de las soldaduras y a la obtención de 35 gramos de viruta fina de la zona de sobreespesor de los cordones. En cada una de las muestras se realizaron cinco determinaciones del porcentaje de nitrógeno existente y se calcularon los valores medios.

Los resultados obtenidos se reflejan en las tablas VI y VII, expuestas a continuación :

Nitrógeno en gas protector	Aporte térmico 0,7 KJ/mm	Aporte térmico 1 KJ/mm	Aporte térmico 1,2 KJ/mm
0 %	0,19	0,18	0,18
2,5 %	0,21	0,20	0,21
5 %	0,24	0,24	0,23
10 %	0,27	0,27	0,28

Tabla VI. – Porcentaje de nitrógeno presente en el metal depositado de las soldaduras realizadas en el acero 2205.

Como podemos observar:

- La cantidad de nitrógeno existente en el metal depositado resultó ser prácticamente independiente del nivel de energía térmica del arco de soldadura, salvo en las soldaduras realizadas con 10% de nitrógeno en el gas de protección, donde se experimentó un ligero aumento al soldar con el mayor aporte térmico.

- El aumento de la proporción de nitrógeno en el gas protector originó un correspondiente incremento de nitrógeno en el metal fundido. Este incremento no es lineal, sino que, a mayores niveles de partida de nitrógeno en el gas de protección, el incremento del porcentaje de nitrógeno del metal fundido es más reducido.

Nitrógeno en gas protector	Aporte térmico 0,7 KJ/mm	Aporte térmico 1 KJ/mm	Aporte térmico 1,2 KJ/mm
0 %	0,23	0,23	0,23
2,5 %	0,26	0,26	0,26
5 %	0,29	0,28	0,29
10 %	0,31	0,33	0,34

Tabla VII.- Porcentaje de nitrógeno presente en el metal depositado de las soldaduras realizadas con el acero 2507.

- En las soldaduras depositadas sobre el acero 2205, los máximos incrementos en el contenido de nitrógeno en metal depositado se produjeron en los cordones realizados con 0,7 KJ/mm y 1 KJ/mm al aumentar el nitrógeno del gas protector desde 2,5% a 5% (incrementos respectivos del 14,3 % y 20 %) y en los cordones realizados con 1,2 KJ/mm, correspondió al paso de 0 % a 2,5 %. Con concentraciones de nitrógeno en el gas de protección superiores al 2,5 % se producen diferencias acusadas entre los contenidos de nitrógeno del metal base y de las soldaduras.
- En las soldaduras realizadas en el superduplex 2507, los mayores incrementos de nitrógeno en metal depositado (13 %) se obtuvieron, con todos los niveles térmicos, al aumentar el contenido de nitrógeno del gas de protección desde 0 % hasta 2,5 %. El contenido de nitrógeno del metal depositado se equiparó al del metal base cuando se utilizó un 5 % de nitrógeno en el gas protector.

4.- CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que se obtienen del trabajo realizado son :

- La adición de nitrógeno a gases de protección convencionales utilizados en la soldadura de aceros duplex y superduplex afectan las características microestructurales del metal depositado y zona afectada térmicamente, actuando sobre la matriz austenítico- ferrítica de estos aceros. El efecto austenitizante del nitrógeno añadido aumenta soldando con altas energías térmicas.
- La disminución del porcentaje de ferrita en el metal de soldadura ha llegado a alcanzar el 25 % soldando con una concentración del 10 % de nitrógeno en el gas protector.
- En el acero duplex 2205 se consigue equilibrio microestructural entre el metal base y el metal depositado soldando con un porcentaje de nitrógeno en el gas de protección del 2,5 %. Este porcentaje no resulta suficiente para lograr tal homogeneidad microestructural en las uniones soldadas realizadas en el acero superduplex 2507, siendo necesario elevar hasta el 5 % el contenido de nitrógeno en el gas protector para alcanzarlo.
- El aumento del contenido de nitrógeno en el gas de protección origina, a cualquier nivel de input térmico, un efecto beneficioso sobre la conformación del cordón reduciendo las irregularidades de su contorno y produciendo un ensanchamiento del cordón y una disminución del ángulo de contacto entre superficie del sobreespesor y la del metal base.
- El contenido de nitrógeno del gas protector no afecta significativamente ni la compacidad de los cordones de soldadura ni el volumen de proyecciones de metal fundido. Estas características resultan, sin embargo, dependientes del nivel de energía térmica del arco de soldadura.
- Las características geométricas de los cordones de soldadura resultan muy afectadas por la concentración de nitrógeno existente en el gas de

protección, pero la magnitud de los cambios depende, asimismo, del aporte térmico utilizado. Generalmente, el aumento de nitrógeno en el gas protector produce un incremento en la anchura del cordón y una disminución de la profundidad de penetración en el metal base y de la altura del sobreespesor.

- Los cordones de soldadura de dimensiones óptimas para aplicaciones normales (no recargues ni soldaduras narrow-gap) se obtienen en los aceros 2205 y 2507 con una concentración del 5 % de nitrógeno en el gas de protección.
- El aumento de la proporción de nitrógeno en el gas protector origina un correspondiente incremento de nitrógeno en el metal depositado. El efecto no es directamente proporcional, sino que, a mayores niveles iniciales de nitrógeno en el gas de protección, se corresponden incrementos más reducidos del porcentaje de nitrógeno del metal fundido. A partir de concentraciones del 5 % de nitrógeno en el gas protector se hace patente este efecto.
- La cantidad de nitrógeno incorporada efectivamente al metal fundido es prácticamente independiente del nivel de energía térmica del arco de soldadura, salvo en las soldaduras realizadas con 10 % de nitrógeno en el gas de protección donde se experimenta un ligero aumento soldando con el mayor aporte térmico.
- La pérdida de nitrógeno del metal base experimentada por difusión a la atmósfera desde el baño de fusión durante el proceso de fusión y solidificación del metal base y conformación del cordón de soldadura puede ser compensada mediante la incorporación de nitrógeno al gas de protección del arco de soldadura.
- En el acero duplex 2205 resulta suficiente la adición del 2,5 % de nitrógeno al gas de protección para, con todos los niveles de energía térmica utilizados, equilibrar la pérdida de nitrógeno del metal base sufrida durante el proceso de soldadura.
- En el acero superduplex 2507 es necesario añadir 5 % de nitrógeno al gas protector para obtener, con cualquier nivel de aporte térmico, soldaduras con idéntica proporción de nitrógeno que la existente en el metal base.

REFERENCIAS

- (1) C. Bonnet, G. Linden, P. Rouault: A new shielding gas for the gas metal arc welding of duplex and superduplex steels. International Conference on Duplex Stainless Steel. Glasgow, 13 16 November 1999.
- (2) T. Palmer, T. DebRoy: Physical modelling of nitrogen partition between the weld metal and its plasma environment.

 Welding Journal. July 1996, pp 197 207.
- (3) G.J. Allum: Nitrogen absorption from welding arcs. International Institute of Welding. July 1997. Doc 212-659-96.
- (4) G. Den Ouden: Influence of alloying elements on nitrogen loss in the weld pool. Philips Welding Reporter, 17, 2000, N° 4.
- (5) C.E. Cross, H.Hoffmeister, G. Huismann: Nitrogen control in Hyperbaric Welding. Welding in the World, vol 42, N° 6, 2000, pp 273 - 282.

RESUMEN DEL TRABAJO REALIZADO POR RAMÓN SANTOS (CENIM)

ADICIÓN DE NITRÓGENO A GASES DE PROTECCIÓN CONVENCIONALES PARA CONTROLAR LAS UNIONES SOLDADAS DE ACEROS INOXIDABLES ALEADOS CON NITRÓGENO.

Ha sido estudiada la influencia de la adición de nitrógeno en proporciones del 0%, 2,5%, 5% y 10% a gases de protección base Ar – 30 He sobre soldaduras realizadas con el procedimiento MIG sobre aceros duplex 2205 y superduplex 2507 con niveles de energía térmica de 0,7 KJ/mm, 1 KJ/mm y 1,2 KJ/mm. utilizando material de aportación varilla – electrodo del tipo SG X 2CrNiMoN 2510 (DIN 8556) y equipos de soldeo automatizados con control en tiempo real de los parámetros del procedimiento.

Ha sido analizada la influencia del contenido de nitrógeno en el gas protector del arco sobre el balance austenítico – ferrítico del metal depositado, llegando a determinar, para los dos aceros, la proporción de nitrógeno que debe incorporarse al gas de protección para optimizar la homogeneidad microestructural entre el metal base y metal depositado con distintos aportes térmicos.

Ha sido realizado el estudio de la influencia cualitativa y cuantitativa del contenido de nitrógeno en el gas de protección sobre las características físicas y geométricas de los cordones de soldadura y sobre otros factores condicionantes de la calidad de la unión soldada, tales como mordeduras, porosidad y proyecciones de metal fundido. Con cada nivel energético del arco de soldadura y cada material base ha sido determinado el porcentaje de nitrógeno que debe estar presente en el gas protector para maximizar la calidad de las soldaduras.

El trabajo ha comprendido también el estudio de las interrelaciones existentes entre el contenido de nitrógeno del metal fundido y la proporción de nitrógeno adicionado al gas de protección, analizando la cantidad de nitrógeno efectivamente incorporado en cada una de las soldaduras realizadas y determinando, para el acero duplex 2205 y el acero superduplex 2507 y cada condición de soldadura utilizada, la cantidad de nitrógeno que se precisa incorporar al gas protector para compensar la pérdida del nitrógeno del metal base experimentada por su difusión a la atmósfera desde el baño de fusión durante el proceso de fusión y solidificación del metal fundido y conformación del cordón de soldadura.

Los resultados obtenidos permiten contemplar como una alternativa fiable en la soldadura de aceros inoxidables aleados con nitrógeno la utilización de gases de protección con nitrógeno incorporado para suministrar este gas al baño de fusión, compensando su pérdida producida por el proceso de soldeo.