

El potencial de conformado del acero inoxidable



Euro Inox

Euro Inox es la asociación para el desarrollo del acero inoxidable en el mercado europeo.

Los miembros de Euro Inox son:

- Fabricantes europeos de acero inoxidable,
- Asociaciones nacionales para el desarrollo del acero inoxidable,
- Asociaciones para el desarrollo de las industrias de los elementos de aleación.

Uno de los objetivos primordiales de Euro Inox es dar a conocer las propiedades exclusivas del acero inoxidable y promover su empleo, tanto para las aplicaciones actuales como en nuevos mercados. Para lograr estos propósitos, Euro Inox organiza conferencias y seminarios, edita guías impresas y en formato electrónico, permitiendo que arquitectos, diseñadores, contratistas, fabricantes, y usuarios finales se familiaricen con este material. Euro Inox también apoya las investigaciones técnicas y de mercados.

ISBN 978-2-87997-214-5

978-2-87997-211-4	Versión inglesa
978-2-87997-212-1	Versión francesa
978-2-87997-213-8	Versión italiana
978-2-87997-215-2	Versión finlandesa
978-2-87997-216-9	Versión sueca
978-2-87997-217-6	Versión holandesa
978-2-87997-218-3	Versión alemana
978-2-87997-219-0	Versión polaca
978-2-87997-220-6	Versión checa
978-2-87997-221-3	Versión turca

Miembros Plenos

Acerinox

www.acerinox.es

ArcelorMittal Stainless Belgium

ArcelorMittal Stainless France

www.arcelormittal.com

Outokumpu

www.outokumpu.com

ThyssenKrupp Acciai Speciali Terni

www.acciaitermi.it

ThyssenKrupp Nirosta

www.nirosta.de

Miembros Asociados

Acroni

www.acroni.si

British Stainless Steel Association (BSSA)

www.bssa.org.uk

Cedinox

www.cedinox.es

Centro Inox

www.centroinox.it

Informationsstelle Edelstahl Rostfrei

www.edelstahl-rostfrei.de

Institut de Développement de l'Inox (I.D.-Inox)

www.idinox.com

International Chromium Development Association (ICDA)

www.icdachromium.com

International Molybdenum Association (IMOA)

www.imoa.info

Nickel Institute

www.nickelinstitute.org

Paslanmaz Çelik Derneği (PASDER)

www.turkpasder.com

Polska Unia Dystrybutorów Stali (PUDS)

www.puds.pl

SWISS INOX

www.swissinox.ch

El potencial de conformado del acero inoxidable
 Segunda edición 2008
 (Serie Materiales y sus Aplicaciones, volumen 8)
 © Euro Inox 2008

Editor

Euro Inox
 Sede de la Organización:
 241 route d'Arlon, 1150 Luxemburgo,
 Gran Ducado de Luxemburgo
 Tel.: +352 261 03 050 Fax: +352 261 03 051
 Oficina Ejecutiva:
 Diamant Building, Bd. Aug. Reyers 80
 1030 Bruselas, Bélgica
 Tel.: +32 2 706 82 67 Fax: +32 2 706 82 69
 info@euro-inox.org
 www.euro-inox.org

Autor

Benoît Van Hecke, Hasselt (B)

Traducción

CEDINOX, Madrid (E)

Reconocimientos

Fotografías de la portada:

- HDE Solutions, Menden (A)
- ThyssenKrupp Nirosta, Krefeld (A)
- Alessi, Crusinallo (I)

Aviso legal

Euro Inox se ha esforzado en asegurar que la información aquí presentada es técnicamente correcta. Sin embargo, se avisa al lector que este material es válido únicamente como información general. Los miembros, dirección y consultores de Euro Inox no se hacen responsables de pérdida, daño o lesión provocada por el uso de la información contenida en esta publicación.

Índice

1. Introducción	3
2. Propiedades mecánicas	4
3. Potencial de conformado	5
4. Acabado superficial	5
5. Nodos hidroconformados para chasis de automóviles	6
6. Diseño higiénico mediante superficies sin costuras	8
7. Rendimiento de las bombas con carcasas hidroconformadas	10
8. Conformado de metales por rotación para diseños exclusivos	12
9. Llantas decorativas conformadas por rotación	14
10. Perfiles laminados en frío para una resistencia extraordinaria	16
11. Placas de intercambiador de calor conformadas por explosión	18
12. Contratuercas embutidas para la decoración de ruedas	20
13. Chapa ondulada para una mayor capacidad de carga	22
14. Referencias	24

Copyright

Reservados todos los derechos. Está prohibido, bajo las sanciones penales y el resarcimiento civil previstos en las leyes, reproducir, registrar o transmitir esta publicación, íntegra o parcialmente, por cualquier sistema de recuperación, y por cualquier medio, sea mecánico, electrónico, magnético, electroóptico, por fotocopia o por cualquier otro, sin la autorización previa por escrito de Euro Inox, Luxemburgo. La vulneración de estos derechos podrá dar lugar al ejercicio de las acciones legales que procedan para su amparo e indemnización de los daños y perjuicios producidos, que incluirán las costas y honorarios de abogados, todo ello de conformidad con la normativa de propiedad intelectual de Luxemburgo y de la Unión Europea.

Acercas de los aceros inoxidables

Los aceros inoxidables son aleaciones de hierro con un contenido de cromo mínimo del 10,5 % (en peso) y de carbono máximo del 1,2 %, necesario para asegurar la formación de una capa de óxido autorreparadora – denominada capa pasiva – que proporciona la resistencia a la corrosión de la aleación. Ésta es la definición de los aceros inoxidables indicada en EN 10088-1.

La composición de los elementos de aleación influye en gran medida sobre la estructura metalúrgica del acero inoxidable y permite definir cuatro familias principales, cada una de ellas con sus propiedades mecánicas, físicas y químicas típicas¹:

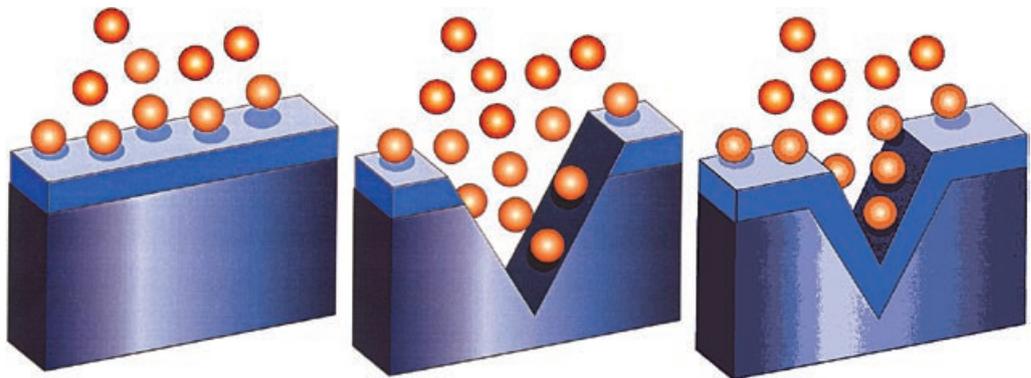
- Aceros inoxidables austeníticos: Fe-Cr-Ni, C < 0,1 % (no magnéticos)
- Aceros inoxidables ferríticos: Fe-Cr (> 10,5 %), C < 0,1 % (magnéticos)
- Aceros inoxidables dúplex: Fe-Cr-Ni, estructura austenoferrítica (magnéticos)
- Aceros inoxidables martensíticos: Fe-Cr, C > 0,1 % (magnéticos y templables)

Estas familias también incluyen tipos que contienen otros elementos como, por ejemplo, molibdeno, titanio, niobio y nitrógeno. Los aceros inoxidables austeníticos representan aproximadamente dos tercios de todo el acero inoxidable utilizado en el mundo.

Los tipos austeníticos EN 1.4301/1.4307 (AISI 304/304L) y EN 1.4401/1.4404 (AISI 316/316L), el ferrítico EN 1.4016 (AISI 430) y sus variantes son los aceros inoxidables más conocidos y están ampliamente disponibles comercialmente.

Las propiedades principales del acero inoxidable pueden resumirse de la siguiente manera:

- resistencia a la corrosión
- atractivo estético
- resistencia térmica
- coste de ciclo de vida reducido
- reciclabilidad total
- neutralidad biológica
- facilidad de fabricación
- alto ratio resistencia/peso



Si se mecaniza la superficie del acero inoxidable o resulta dañada accidentalmente, la capa pasiva se regenera instantáneamente en presencia del oxígeno del aire o el agua.

¹ En la página Web www.euroinox.org/technical_tables (una base de datos interactiva) o en el folleto impreso *Tables of Technical Properties* (Materials and Applications Series, Volume 5), 2ª ed., Luxemburgo: Euro Innox, 2007, puede encontrarse información detallada acerca de las propiedades químicas, mecánicas y físicas de los aceros inoxidables.

1 Introducción

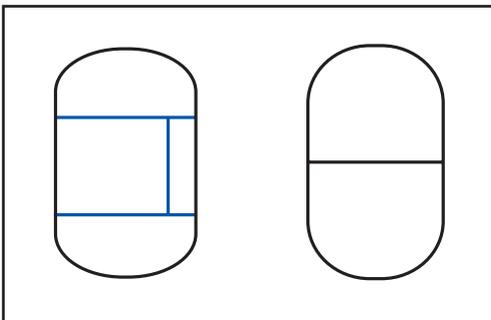
El acero inoxidable ofrece un gran potencial en aplicaciones de conformado gracias a sus propiedades mecánicas. El alto ratio resistencia/peso del material y sus considerables propiedades de alargamiento y endurecimiento por deformación plástica significa que se pueden realizar diseños de gran complejidad, tridimensionales y sin costuras.

Puesto que su uso en este tipo de diseños no compromete sus propiedades de resistencia a la corrosión, resistencia térmica y cualidades decorativas, el acero inoxidable resulta ser el material más adecuado para productos tanto industriales como de consumo.

El coste de producción comprende:

- el coste del material
- el coste de transformación

Si bien es posible que el acero inoxidable no sea siempre el material más barato, las simplificaciones de los procesos de producción asociadas a su uso pueden compensar el coste más elevado del material como, por ejemplo, al reducir el número de etapas de la embutición profunda o los tratamientos térmicos.



Los barriles de cerveza y de otras bebidas (normalmente de 20-70 l) pueden fabricarse de diferentes maneras gracias a las propiedades mecánicas del acero inoxidable. Los diseños de tres piezas (ejemplo de la izquierda) son una opción, utilizando dos fondos embutidos y chapa de acero inoxidable conformada en frío para la sección media. El conformado en frío del acero inoxidable potencia sus propiedades mecánicas. El uso de este tipo de acero para la sección media mejora la resistencia del barril o hace posible reducir el espesor de pared sin que la resistencia se vea mermada. Podría optarse por este diseño si la reducción de peso fuese clave.



La capacidad de conformado del acero inoxidable también permite alternativamente diseños de dos piezas (ejemplo de la derecha), consistentes en dos mitades idénticas fabricadas mediante embutición profunda. Este diseño resulta preferible cuando la reducción de soldaduras es el parámetro más importante. Aparte de su potencial de conformado, el acero inoxidable es con frecuencia el material más apropiado para el contacto con los alimentos, ya que cumple las Normas Europeas relativas a la seguridad de los alimentos.

Diseño de tres piezas frente a diseño de dos piezas.
Fotografías: AEB, Vimercate (I)

2 Propiedades mecánicas

Para la evaluación del potencial de conformado de cualquier material es necesario comprender sus propiedades mecánicas. Los criterios de evaluación mecánica más utilizados son los siguientes:

Resistencia: grado de resistencia de un material a la deformación. En función de diversas consideraciones estructurales, la deformación puede definirse como:

- “fluencia” o deformación plástica permanente (de aquí se deriva “límite elástico” R_p), o
- “rotura” (deriva “resistencia a la tracción” R_m)

Dureza: grado de resistencia a la penetración permanente causada por una carga aplicada.

Tenacidad: capacidad de absorber energía de deformación antes de que se produzca la rotura.

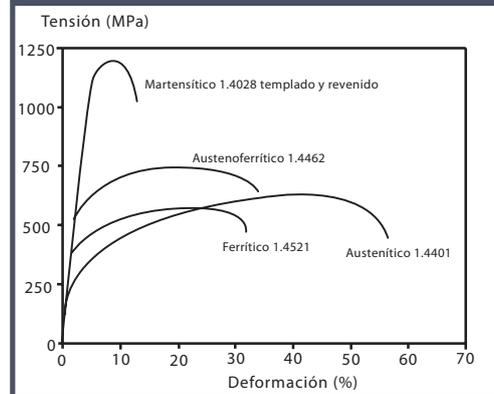
Ductilidad: capacidad de deformarse plásticamente sin romperse.

Los conceptos “fuerte” y “débil”, “duro” y “blando”, “tenaz” y “frágil” definen diferentes aspectos de las propiedades mecánicas de los materiales. Algunas de éstas pueden medirse mediante un ensayo de tracción. Los resultados se plasman en un gráfico cuyos ejes son la tensión aplicada y la deformación resultante (relacionado con la “resistencia”).

El punto final de las curvas corresponde al alargamiento de rotura y es una medida de la ductilidad del material.

Los aceros martensíticos presentan una elevada resistencia y una ductilidad (o conformabilidad) relativamente baja, mientras que los aceros austeníticos tienen una resistencia más reducida y una alta ductilidad.

Curvas tensión-deformación para diferentes tipos de acero inoxidable.



Los aceros austenoferríticos (o dúplex) y los aceros ferríticos ocupan una posición intermedia. El límite elástico de los ferríticos es normalmente más alto que el de los austeníticos, mientras que el de los dúplex es considerablemente mayor que el de los ferríticos y austeníticos. Los aceros ferríticos y dúplex presentan una ductilidad similar².

A excepción de los martensíticos, las relaciones típicas del gráfico son válidas para el estado recocido, en el que normalmente se suministran los aceros inoxidables. Para completar la información y comprender el potencial de conformado del acero inoxidable, es necesario tener en cuenta que las propiedades mecánicas del material dependen de:

- la composición química
- el tratamiento térmico (para los martensíticos)
- el trabajo en frío (para los austeníticos y dúplex)

² Para más información acerca de las pruebas específicas de dureza y tenacidad (también denominadas “resistencia al impacto”) de los aceros inoxidables: CUNAT, Pierre-Jean, *Working with Stainless Steel* (Materials and Applications Series, Volume 2), París: Sirpe, 1998,.

También, se pueden alcanzar altos niveles de resistencia mediante el trabajo en frío de los aceros inoxidable. De hecho, el “endurecimiento por deformación” distingue a estos aceros de la mayoría de materiales metálicos.

Por lo tanto, los austeníticos y dúplex trabajados en frío ofrecen una interesante combinación de resistencia y conformabilidad, en términos de potencial ahorro de peso.

3 Potencial de conformado

Con el fin de ilustrar el potencial de conformado del acero inoxidable, presentamos nueve casos de diseños domésticos e industriales de acero inoxidable. En cada uno de ellos se describen brevemente:

- los principios de la operación de conformado
- los requisitos de material del producto diseñado
- las propiedades que hacen factible al acero inoxidable
- la fabricación real del producto utilizando acero inoxidable³

4 Acabado superficial

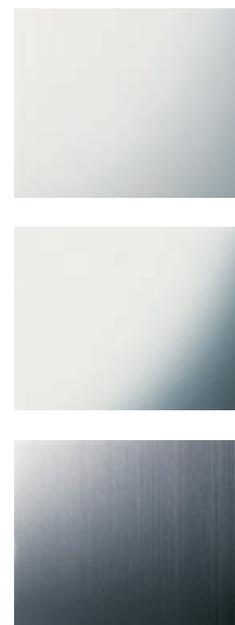
La Norma Europea EN 10088-2 proporciona información acerca de los acabados disponibles (y su terminología). Los acabados más habituales en las aplicaciones de conformado y sus rangos de espesor típicos son los siguientes⁴:

- laminado en frío ligeramente reflexivo 2B (0,40 – 8,00 mm)
 - laminado en frío altamente reflexivo (recocido brillante) 2R (< 3,00 mm)
 - laminado en frío pulido (2G) o cepillado (2J)
- También se utilizan los acabados laminado en caliente (1D; > 2,00 mm) y en frío (2H; < 6,00 mm).

Normalmente las deformaciones intensas destruyen las superficies decorativas. Sin embargo, en el caso del acero inoxidable es posible conseguir formas relativamente complejas sin necesidad de otros procesos posteriores a la fabricación (acabado mecánico).

Algunos fregaderos de bajo coste, por ejemplo, se fabrican directamente en acero inoxidable recocido brillante (2R) sin pulido adicional. El hecho de que el acabado superficial sobreviva a la operación de conformado hace que la combinación material-técnica de conformación sea eficaz en función de los costes.

Acabados habituales adecuados para el conformado: 2B, 2R y 2G/2J



³ El objetivo de esta publicación es informar de procesos que aprovechan al máximo el potencial de conformado del acero inoxidable. La información acerca de las empresas que pueden llevarlos a cabo puede obtenerse a través de Euro Inox o sus miembros.

⁴ Ver Anexo B de la publicación *Acabados superficiales* (Serie de Construcción, Vol. 1), Luxemburgo: Euro Inox, 2000.

5 Nodos hidroconformados para chasis de automóviles

La hidroconformación permite crear formas complejas a partir de tubos. El proceso es el siguiente:

- se inserta un tubo de acero inoxidable en la matriz
- se sellan ambos extremos
- se llena el tubo con fluido (normalmente agua o aceite)
- se ejerce presión sobre el acero inoxidable a través del efecto combinado de la presión del fluido (radial) y la compresión (axial) de los extremos del tubo.

El proceso, que puede utilizarse para crear casi cualquier forma compleja, ofrece las siguientes ventajas con respecto a las técnicas convencionales

- superficie de las piezas intacta (sin gripado ni manchas causadas por el lubricante)
- tolerancias más ajustadas

estado aplicando este principio durante años, utilizando una estructura soldada de tubos de inoxidable. Ello suponía uniones fabricadas mediante doblado, corte y soldadura (imagen superior derecha).

Las ventajas de montaje de estos nodos hidroconformados incluyen:

- reemplazo del conjunto convencional soldado de tubos
- separación de la costura soldada y el corte (así la variación metalúrgica y mecánica se producen en distintas áreas)

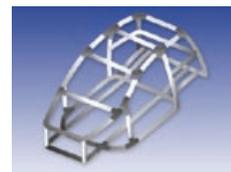
Los beneficios incluyen:

- normalización de la fabricación
- soluciones modulares
- mayor rigidez y resistencia, permite la reducción de peso
- reducción de costes

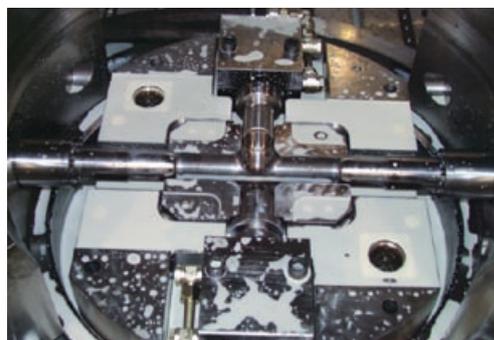
Fabricación de nodos de chasis de automóviles

Actualmente se están teniendo en cuenta las “estructuras tridimensionales” metálicas (imagen superior izquierda) como solución para la construcción de chasis. De hecho, los fabricantes de autobuses han

Modelo: P-J Cunat, Joinville-le-Pont (F)



Fotografía: HDE Solutions, Menden (A)



Herramienta de hidroconformación y fotografía: ArcelorMittal Centre Auto-Applications, Montataire (F)



Nuevas piezas de estructura tridimensional con nodos hidroconformados

Fotografía: ArcelorMittal Stainless Europe, La Plaine Saint-Denis (F)

Comportamiento de la deformación del acero inoxidable durante la hidroconformación

Durante la hidroconformación algunas áreas se deforman en gran medida, lo que provoca el “endurecimiento por deformación” del metal. Esta ventaja adicional del acero inoxidable potencia las propiedades mecánicas del componente, mejorando tanto su comportamiento estático como a fatiga.

Las áreas deformadas, donde el esfuerzo es máximo, se sitúan lejos de las áreas soldadas. Esto es justo lo contrario de lo que sucede en las piezas clásicas, donde las áreas soldadas también son las más críticas.



*Nodo hidroconformado
Fotografía: HDE
Solutions, Menden (A)*

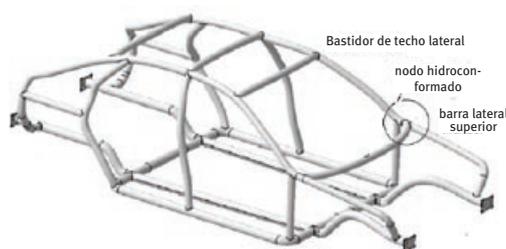
Ventajas de los nodos de acero inoxidable hidroconformados

Las ventajas de la combinación de hidroconformación y acero inoxidable incluyen:

- mejor alineamiento axial
- perpendicularidad perfecta (sin riesgo de distorsiones térmicas tras la soldadura)
- posibilidad de soldadura automática (al nodo en lugar de en el nodo)

- mejor precisión del espesor/geometría
- mejor distribución de las tensiones

Resultado: reducción del número de piezas, de la chatarra generada, del número de troqueles y de la cantidad de material, lo que se traduce en reducción de costes.



*Modelo y fotografía: ArcelorMittal Stainless Europe,
La Plaine Saint-Denis (F)*

6 Diseño higiénico mediante superficies sin costuras

Entre los requisitos de diseño aplicables a los utensilios de cocina, que estarán en contacto con los alimentos se incluyen:

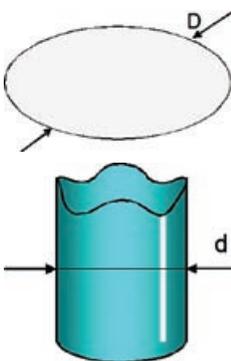
- unas superficies higiénicas y de fácil limpieza
- una distribución térmica eficaz (para cocinar), pero con unos mangos que no provoquen quemaduras
- resistencia al impacto y al desgaste

Más allá de los aspectos técnicos, las consideraciones del estilo de vida añaden requisitos de acabado y forma. El proceso de fabricación de una cazuela de diseño, ilustrado a continuación, muestra las razones por las que durante décadas el acero inoxidable ha sido el material elegido.

Transformación de un disco metálico plano en un cuerpo hueco

Sorprendentemente, la fabricación de este elegante recipiente comienza a partir de un disco plano, de 1 mm de espesor y unos 400 mm de diámetro. El tipo EN 1.4301 con una superficie laminada en frío 2B absorberá la considerable tensión aplicada por la prensa o prensas implicadas. El diámetro del disco se reduce a la mitad durante este proceso – lo cual representa en términos generales el límite de la capacidad de conformado del material⁵.

El acero inoxidable puede adoptar formas más profundas, siempre que se restaure su capacidad de deformación plástica. Esto se consigue mediante un tratamiento térmico intermedio (recocido) por encima de 1000 °C. A estas temperaturas, las superficies del acero inoxidable se oxidan. Puesto que esta superficie ennegrecida contaminaría el utillaje más allá de las prensas y dificultaría el pulido, se aplica un tratamiento químico para eliminarla y recuperar el estado pasivo de la superficie. Así, es posible someter la forma cilíndrica nueva a embutición profunda para obtener mayores longitudes.



Ratio de Límite de Embutibilidad
(LDR) = D/d . Los valores LDR típicos para los aceros inoxidables se sitúan entre 1,8 y 2.



⁵ La Relación de Límite de Embutibilidad (LDR) hace referencia al cociente del diámetro máximo de la chapa (D) que puede embutirse en un cilindro en un solo paso y el diámetro (d) de ese cilindro.

De volumen conformado a artículo de diseño

Para hacerla adecuada para el calentamiento por inducción, en el fondo de la cazuela se instala un disco ferrítico (Cr). Este último es magnético, a diferencia del austenítico (Cr-Ni) con el que está fabricado el cuerpo.

Para una distribución térmica óptima se inserta un disco de aluminio entre ambos. Las tres piezas se unen fuertemente mediante una operación de troquelado y soldadura fuerte.



Si bien el aspecto mate del disco de partida carece del brillo requerido por el diseñador, la rugosidad de su superficie es lo suficientemente baja como para que el acabado final sea admisible.

Una vez completados los pasos principales del montaje, el cuerpo de la cazuela puede esmerilarse y pulirse. Para ello, existen diversos medios abrasivos, estropajos Scotch-Brite™ y pastas de pulido (para el acabado final).



El conformado del acero inoxidable no se limita a formas cilíndricas. También es posible dar al cilindro(derecho) un perfil curvo más complejo (a la izquierda de la imagen) con ayuda de una matriz de metales de dos piezas, de la forma final necesaria, y un punzón (centro) fabricado a partir de una serie de discos de polímeros duros de diversas propiedades.



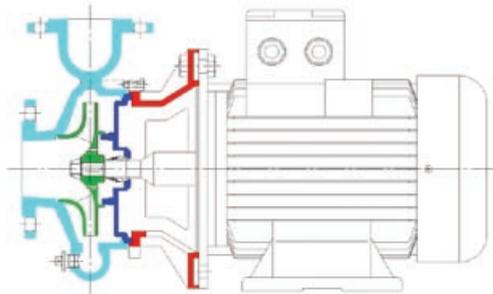
Un material versátil para diseños higiénicos

Gracias a sus propiedades de soldadura, conformado y acabado, el acero inoxidable satisface los requisitos de los utensilios de cocina relativos a un diseño sin costuras (higiénico), superficies no adherentes, rigidez a largo plazo, adecuación para el calentamiento por inducción, etc. El uso de estas formas puede emplearse en otras aplicaciones de diseños higiénicos.

Los mangos, fabricados con barras redondas o planas, se sueldan al cuerpo de la cazuela. La reducción máxima de la superficie de contacto y el uso de acero inoxidable austenítico (cuya conductividad térmica es menor que la de otros aceros), proporcionan unos mangos óptimos para un uso seguro sin quemaduras.

7 Rendimiento de las bombas con carcadas hidroconformadas

Las piezas principales de una bomba centrífuga convencional



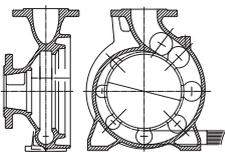
Las bombas centrífugas aumentan la energía (creada por un motor) del fluido que fluye a través de ellas, desplazando el fluido y aumentando su presión. Consta de:

- un motor eléctrico y un eje
- una carcasa fija (azul claro)
- una rueda móvil (verde)
- un cierre (azul) y un soporte (rojo)

El impulsor transforma la energía del motor en energía del fluido (suma de la presión, la energía cinética y la potencial).

La función hidráulica de la carcasa consiste en guiar el fluido hacia el impulsor en la entrada, separar las zonas de baja y alta presión y guiar el fluido que abandona el impulsor hacia la salida, incrementando su presión reduciendo su velocidad. Desde un punto de vista mecánico, la carcasa debe ser capaz de resistir la presión operativa, soportar la bomba (dependiendo del modelo) y absorber las tensiones procedentes de las conducciones conectadas.

Diseño de carcasa en espiral



Con el fin de aumentar la presión del fluido cuando éste abandona las paletas del impulsor, la carcasa incorpora una caja en espiral, cuya sección transversal se incrementa a medida que se desarrolla la espiral. Esto permite la reducción de la velocidad del fluido

(necesaria para aumentar su presión) con la menor cantidad de pérdidas por fricción posible. La fabricación de una caja espiral metálica que respete estos complejos principios de diseño parece bastante complicada.

De piezas fundidas a carcadas embutidas

Tradicionalmente se utilizan piezas fundidas de hierro colado, acero o bronce para la carcasa. Recientemente se ha comenzado a fabricar carcadas en acero inoxidable mediante embutición profunda, combinando la relación resistencia/peso superior y las excelentes propiedades de conformado para producir un producto de peso ligero pero mecánicamente resistente.



Carcasa de hierro colado



Carcasa de acero inoxidable embutida

Ventajas del uso de acero inoxidable



Bomba centrífuga con carcasa de acero inoxidable

Las carcadas de acero inoxidable aseguran:

- reducción del peso gracias a las mejores propiedades mecánicas (que se traduce en unas bombas compactas y de fácil manejo)
- un aspecto superficial de la superficie y facilidad de mantenimiento
- mayor eficacia de la bomba gracias a su superficie lisa



Carcasa de bomba fabricada mediante embutición profunda a partir de una chapa de acero inoxidable. La entrada está situada en la parte frontal y el fluido abandona la carcasa a través de un orificio hidroconformado en la parte posterior.

Ventajas del uso de la hidroconformación

Los diseños de las carcasas pueden ser muy simples (una sección transversal circular) o bastante complejos (incorporando la caja espiral). Estos últimos, fabricados normalmente soldando dos mitades jun-



La caja espiral se integra en la carcasa de la bomba por hidroconformación. Se proporciona un cuidadoso acabado al orificio de salida para mejorar el rendimiento.

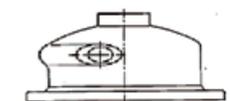
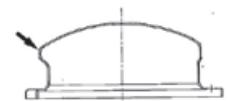
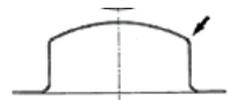
tas, ofrecen con frecuencia una mejora del rendimiento de la bomba. La hidroconformación, no obstante, hace posible integrar la caja en espiral en un diseño de carcasa de acero inoxidable, todo ello en una sola

pieza, evitando las soldaduras y reduciendo el riesgo de corrosión.

Producción de una carcasa de bomba de acero inoxidable hidroconformada

Comenzando con una chapa de acero inoxidable circular (de 1,5 a 3 mm de espesor, dependiendo del modelo), la carcasa se completa mediante las siguientes operaciones:

- embutición profunda, para proporcionar a la carcasa el volumen necesario
- hidroconformación de la caja espiral utilizando una presión de agua >1.000 bar
- taladrado y fresado
- soldadura de los accesorios y soporte en la parte externa



Etapas de la fabricación de una carcasa: embutición profunda, hidroconformación, taladrado y fresado, aplicación de accesorios

8 Conformado de metales por rotación para diseños exclusivos

El conformado por rotación es un proceso que no implica pérdida de material. Requiere:

- una chapa de metal circular o una preforma obtenida mediante embutición profunda
- un rodillo
- una matriz montada en torno de simetría circular

La chapa se estira sobre la matriz por etapas mientras que la matriz y la pieza son accionadas por el torno. Debido a las altas presiones existentes, la lubricación es importante para evitar que la pieza se adhiera a la matriz, lo que podría causar daños en la superficie.

Normalmente este proceso implica una inversión de capital menor, unos costes de herramientas, configuración y conmutación más reducidos y un menor consumo de energía que el proceso de prensa de embutición. No obstante, debido a que la productividad es baja, resulta más adecuado para

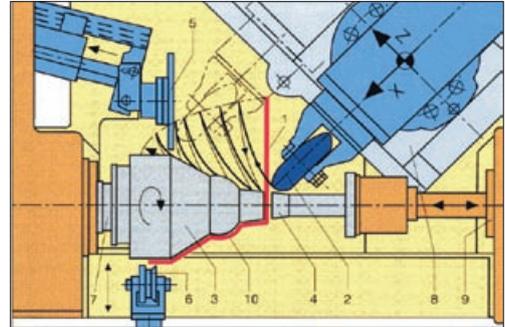
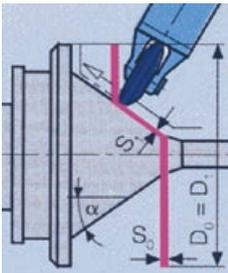


Diagrama: Leifeld Metal Spinning, Ahlen (A)

la fabricación de prototipos y series pequeñas. Este proceso se efectúa sin reducción del espesor del metal.

También es posible conformar formas cónicas en una sola etapa, siempre que haya un ángulo de apertura mínimo de unos 12° (menos si el proceso consta de más etapas). El diámetro del extremo abierto del cono corresponde al diámetro inicial del disco, así que se produce un cierto grado de reducción del espesor de la pared (dependiendo del ángulo).

Diagrama: Leifeld Metal Spinning, Ahlen (A)



Como alternativa a los procesos de conformado clásicos como la embutición profunda y el estirado, el conformado por rotación resulta ideal para las formas cónicas o cilíndricas.

Es posible obtener unas relaciones altura/diámetro considerables a partir de un simple disco de acero inoxidable bidimensional.



Fotografía: ThyssenKrupp Nirosta, Krefeld (A)

Conformado por rotación en torno

La fuerza ejercida por la herramienta produce esfuerzos de compresión en la chapa de acero inoxidable, lo que provoca el endurecimiento rápido por deformación y la consiguiente reducción de la conformabilidad. Por lo tanto, este proceso sólo se utiliza básicamente con espesores limitados. El proceso se adapta perfectamente a los tipos con un límite elástico y un índice de endurecimiento por deformación reducidos, como por ejemplo los ferríticos (EN 1.4016) y algunos austeníticos (denominados “estables”), cuyo endurecimiento por deformación se produce lentamente, tales como EN 1.4301 o, en mayor medida, EN 1.4303.

Este proceso produce formas de acero inoxidable con alta simetría circular. Como consecuencia, el pulido posterior a la fabricación puede efectuarse a coste moderado.

Patas de un taburete fabricadas en acero inoxidable

Los taburetes de bar son un producto con una gran simetría circular. Puesto que las patas de los taburetes deben ser lo bastante fuertes como para proporcionar estabilidad, los materiales férricos (acero inoxidable o común) resultan más adecuados para estas piezas que el aluminio, cuya densidad sólo es un tercio de la de las aleaciones de acero. Al ser piezas que requieren de limpieza regular, las patas de acero pintado no suelen durar mucho: el uso regular de productos de limpieza provoca el desgaste de la pintura, lo que afea considerablemente el mobiliario de diseño.

La fabricación de las patas de taburete en acero inoxidable resulta ser una excelente solución para este problema. La alta simetría circular de los productos de acero inoxidable fabricados mediante conformado por rotación facilita el pulido automático posterior, tal como se muestra en la fotografía.

El acabado superficial liso del acero inoxidable laminado en frío no requiere de ninguna preparación costosa.



Los taburetes de bar tienen una alta simetría circular. Las patas de acero inoxidable son resistentes a los productos de limpieza agresivos.

*Fotografía:
Thate, Preetz (A)*



*Fotografía:
Thate, Preetz (A)*

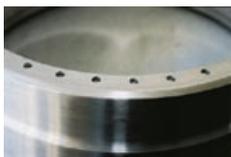
9 Llantas decorativas conformadas por rotación

Los propietarios de vehículos en busca de lo exclusivo intentan personalizar sus vehículos de acuerdo a sus gustos. Las llantas de diseño son una muestra de esta tendencia. Puesto que el conformado por rotación en torno es un proceso adecuado para series reducidas, las llantas de acero inoxidable fabricadas mediante esta técnica ofrecen las siguientes ventajas:

- elevada relación resistencia/peso (permite estructuras ligeras)
- aumento de la resistencia a través del trabajo en frío
- superficie laminada en frío lisa, que facilita el pulido
- mayor resistencia a la corrosión que los metales tradicionales
- ausencia de pintura (puede descascarillarse)



Fabricación de una rueda de diseño típica



Rueda de diseño consistente en tres piezas: el cubo estrella (parte superior), la llanta interior (medio) y la llanta exterior (parte inferior). Esta última está fabricada en acero inoxidable, que ofrece una combinación de alta resistencia, peso ligero y superficie lisa.

Las ruedas decorativas pueden fabricarse en dos o tres piezas, dependiendo del modelo. Un modelo de tres piezas incluye:

- un cubo estrella (fundamentalmente en aluminio fundido)
- una llanta interior (fundamentalmente en aluminio fundido)
- una llanta exterior (potencialmente en acero inoxidable)

El cubo estrella se fija con pernos a la llanta interior a través de la llanta exterior, utilizando pernos de aleación noble para evitar la corrosión galvánica.

La llanta exterior inoxidable se fabrica por conformado por rotación en torno, seguido



Montaje del cubo de estrella en la llanta interior a través de la llanta exterior.

de un pulido automatizado. Además de proporcionar una superficie visualmente atractiva, el pulido aumenta la resistencia a la corrosión de esta pieza, que se verá expuesta a diversas condiciones atmosféricas (ej: sal para el hielo).

Para el fabricante, el uso de acero inoxidable evita realizar un acabado superficial poco respetuoso con el medioambiente.

Conformado por rotación de la llanta exterior

La llanta exterior se conforma a partir de una chapa de acero inoxidable circular. Ésta puede adquirirse directamente a un proveedor o cortarse a partir de chapas cuadradas.

Para facilitar la fabricación, los agujeros de montaje se practican antes del conformado. La chapa se monta en un torno contra una matriz circular. El rodillo de conformado ejerce presión sobre la chapa, que va adoptando la forma de la matriz. Se añaden progresivamente más anillos al torno, lo que va permitiendo el conformado

de la chapa. Es necesario utilizar lubricantes apropiados.

Durante el conformado en frío, el acero inoxidable adquiere una mayor resistencia (un fenómeno denominado endurecimiento por deformación). Si bien un exceso de este efecto dificulta el conformado por rotación, sí contribuye más a la resistencia de la llanta exterior, que deberá absorber los impactos producidos por los baches inesperados durante la conducción.



Conformado por rotación de la llanta exterior. El acero inoxidable aumentará su resistencia durante el conformado para amortiguar impactos.

Resistencia superior de las ruedas de acero inoxidable

Los aceros inoxidables austeníticos presentan propiedades mecánicas interesantes. No sólo poseen una resistencia a la tracción (R_m) elevada, sino que los procesos de conformado en frío más el conformado subsiguiente del borde de la llanta exte-

rior, incrementan su resistencia mecánica. Además de mantener las llantas libres de daños producidos por la gravilla proyectada, esta característica también hace del acero inoxidable un material muy adecuado para los elementos de diseño en contacto accidental con el pavimento de piedra.



10 Perfiles laminados en frío para una resistencia extraordinaria



El laminado de perfiles es un método bien conocido para la obtención de formas metálicas largas y complejas a partir de listones de metal. Si se tiene en cuenta el proceso ya en la fase de diseño, es posible reducir costes de forma significativa durante la producción al evitarse, por ejemplo, los conjuntos soldados de subperfiles en forma de C y de U. El laminado de perfiles es una buena manera de combinar varias funciones en un solo perfil: refrigeración, fijación, transporte de cables, etc.

Tradicionalmente, el laminado de perfiles ofrece soluciones a la construcción (marcos de ventana y de puerta), al transporte (camiones, autobuses y vagones de ferrocarril) y las ingenierías y la industria de mobiliario de oficina. Pero también están emergiendo otros sectores (como la automoción), debido a la alta capacidad del laminado de perfiles de integrar diferentes funciones en un único elemento estructural.

Laminado de perfiles a partir de flejes de acero inoxidable

El proceso de laminado de perfiles es similar al de fabricación de tubo. Una línea de con-



formación de unidades transforma el fleje metálico (normalmente ancho < 1000 mm) en un perfil que a su vez puede soldarse a otro contiguo o bien continuar abierto hasta el final. Se puede conformar acero inoxidable de espesor entre 0.40 y 8 mm y aprovechar su excepcional capacidad de absorción de deformación plástica. Este proceso de conformación gradual aumenta las propiedades mecánicas del acero inoxidable, haciendo posible perfiles de rigidez superior y formas más complejas. Cuantos más pasos de conformación se hagan, más gradual será la absorción de deformación plástica y menor será la tensión generada en el material. Esto puede ser importante para satisfacer los requisitos de tolerancias dimensionales durante el ensamblaje.

Valor añadido para diversos usos finales

Con el fin de añadir valor a un perfil, el proceso de laminado puede completarse con operaciones tales como:

- taladrado de patrones de agujeros
- soldadura de soportes
- doblado o estirado para producir perfiles tridimensionales



Perfiles de acero inoxidable para bastidores de vagones de pasajeros

Tradicionalmente, los vagones de pasajeros consisten en un bastidor inferior y un cuerpo. El cuerpo se fabrica en materiales tales como acero al carbono pintado, aluminio o acero inoxidable. Los componentes de acero inoxidable pueden fabricarse mediante laminado de perfiles a partir de listones de espesores entre 0,40 a más de 6 mm.

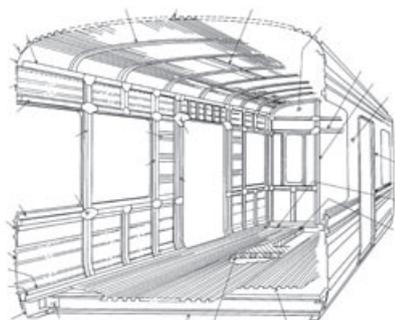


Ilustración: Nickel Institute, Toronto (CND)

Potencial de reducción de peso del acero inoxidable para vagones de pasajeros

Puede utilizarse el tipo 1.4301, pero el 1.4318 (con nitrógeno añadido y menor contenido de níquel) ofrece unas propiedades mecánicas iniciales superiores. Además, las propiedades mecánicas de este tipo se potencian si se refuerzan los listones de acero inoxidable (mediante conformado en frío) en las acerías antes del laminado de perfiles⁶. Por lo tanto, el uso de acero inoxidable 1.4318 ofrece un potencial de reducción de peso para los postes, vigas y bastidores de los vagones.

Obviamente, los vagones más ligeros consumen menos energía durante la aceleración y la desaceleración, una característica especialmente importante en los trenes de cercanías que paran y arrancan en breves intervalos.

Existe un considerable potencial de reducción de peso mediante el uso combinado de :

- acero inoxidable (en lugar de acero al carbono)
- Tipo 1.4318 (para una resistencia superior gracias al endurecimiento por deformación)



Fotografía: ArcelorMittal Stainless Belgium, Genk (B)

- laminado de perfiles
- Otras ventajas del uso de acero inoxidable para los cuerpos de los vagones de pasajeros incluyen:
- mantenimiento reducido (no es necesario pintar los cuerpos)
 - ciclo de vida largo (no se produce reducción del espesor a largo plazo como resultado del desgaste)
 - aumento de la seguridad ante incendios en comparación con otros metales (ligeros)
 - incremento de la seguridad estructural frente a choques (debido a las propiedades mecánicas)



Fotografía: Outokumpu, Espoo (FIN)

⁶ Puede encontrarse información detallada en el CD-ROM de Euro Inox, *Stainless Steel for Structural Automotive Applications – Properties and Case Studies* (Serie del Automóvil, Vol 1, Parte3), Luxemburgo: 2006.

11 Placas de intercambiador de calor conformadas por explosión



El conformado por explosión utiliza la elevada presión dinámica de una onda de choque para presionar una chapa de metal contra la forma de una matriz y conformarla, todo ello a gran velocidad.

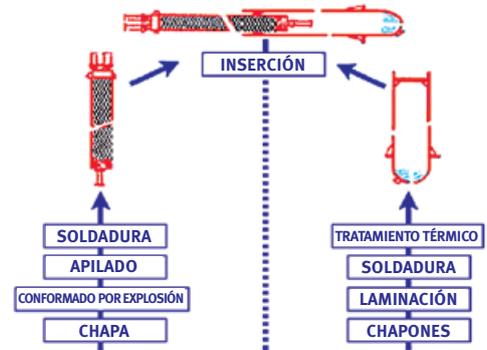
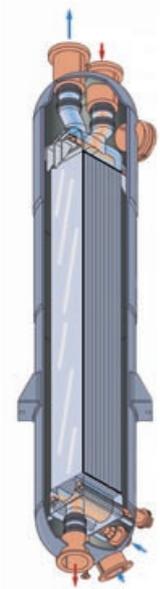
Normalmente este proceso se lleva a cabo con la carga explosiva en agua, a una cierta distancia de separación de la pieza que va a conformarse. La onda de choque actúa como punzón.

En comparación con otros métodos de conformado más convencionales, las ventajas del conformado por explosión hacen posible:

- trabajar con chapas de gran tamaño (gracias al uso de explosivos)
- utilizar espesores de chapa elevados (> 10 mm en el caso de aleaciones de Ni)
- producir formas elaboradas (reduciendo las operaciones tales como soldadura y tratamiento térmico)
- productos con una elevada resistencia mecánica
- dimensiones muy precisas

Intercambiadores de calor de placas de gran tamaño

Los intercambiadores de calor de placas (PHE) soldados de gran tamaño se encuentran normalmente en las refinerías de petróleo y en la industria petroquímica. Los exigentes requisitos del intercambio de calor precisan de una superficie de contacto grande, combinada con una transferencia térmica eficaz a elevadas temperaturas. Si la superficie de contacto es superior a varios miles de metros cuadrados, un único PHE de este tamaño resultará más económico que un único intercambiador de calor



de placas tipo casco (o incluso una serie de ellos).

Normalmente un PHE está formado por cientos de láminas de acero inoxidable conformadas por explosión. Estas láminas tienen un espesor entre 0,8 y 1,5 mm y pue-



den tener hasta 2 m de anchura y 15 m de longitud. Tras el conformado por explosión lámina a lámina, éstas se apilan y sueldan juntas en grupo. Las ondulaciones en forma de V de las placas crean un patrón de flujo turbulento que asegura una elevada eficacia de la transferencia térmica.

El grupo se inserta en una vasija a presión. La conexión entre el grupo y la vasija se efectúa mediante juntas de dilatación.

Ventajas del uso de acero inoxidable

Este material ofrece varias ventajas:

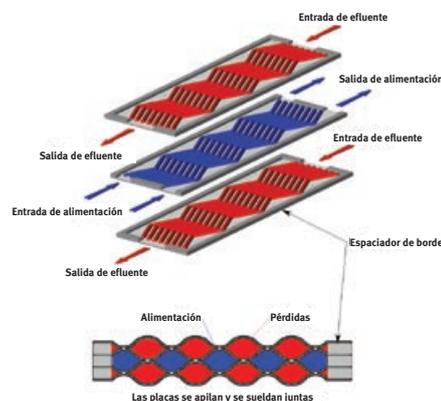
- Las temperaturas de proceso típicas oscilan entre 300 °C y 550 °C (con un máximo de 650 °C). Esto no supone problema alguno para los tipos EN 1.4541 (AISI 321).
- Los aceros inoxidables resisten presiones de trabajo previstas típicas de hasta 123 bar y diferencias entre la presión de entrada y salida de 40 bar.
- El uso de velocidades de conformado elevadas (de hasta 120 m/s) en el conformado por explosión ofrece un efecto de endurecimiento por deformación adicional sobre las placas onduladas de acero inoxidable.
- El patrón ondulado (que provoca un flujo turbulento), combinado con la baja rugosidad de la superficie (que no se ve afectada por el proceso de fabricación), limita el riesgo de obturación (“incrustaciones”) y de bajo rendimiento del intercambio de calor.
- La selección adecuada de tipos reduce el riesgo de corrosión causado, por ejemplo, por los sulfuros del petróleo.



- Las técnicas de soldadura convencionales pueden utilizarse para sellar herméticamente la pila de placas onduladas.

Una combinación de éxito

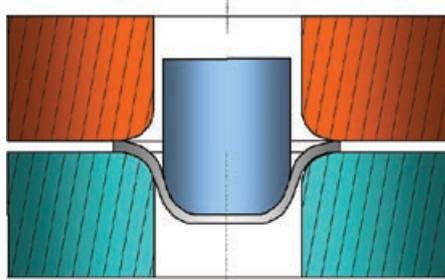
Ni el conformado por explosión ni el acero inoxidable constituyen una innovación. Pero el desarrollo de intercambiadores de calor de placas de gran tamaño que explotan al máximo tanto los tamaños y las propiedades del acero inoxidable como el proceso de conformado por explosión es un significativo activo de reducción de costes en la operación diaria de la industria petroquímica, gasista y refinerías.



12 Contratueras embutidas para la decoración de ruedas

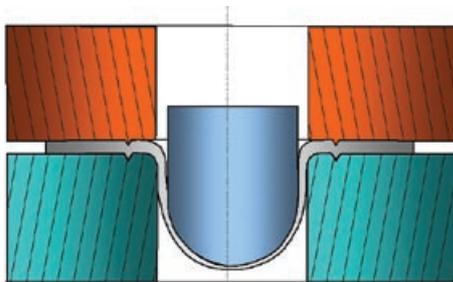
Normalmente los aceros inoxidable presentan unas excelentes propiedades de conformado. Si bien la mayor parte de estas operaciones se efectúan con acero inoxidable austenítico (Cr-Ni), los ferríticos (Cr) también son aptos, siempre que el metal no se someta tan sólo a estirado. La diferencia entre la embutición y el estirado se explican a continuación.

Embutición



- el metal fluye libremente al interior de la matriz
- la deformación de un círculo grande para convertirse en un cilindro estrecho debe proceder de la anchura más que del espesor (= anisotropía alta “r”)

Estirado



- el metal es retenido por el pisador
- considerable reducción del espesor
- necesario un elevado alargamiento (A%) y endurecimiento (n)

En la práctica, el modo de conformación es normalmente una combinación de estirado y conformado, lo que explica el uso frecuente de los austeníticos.

Embutibilidad de los tipos ferríticos

Los ferríticos presentan unos valores LDR ligeramente más altos (consultar la página 8) que los austeníticos, lo que los hace especialmente adecuados para la embutición. El fenómeno conocido como “roping” es típico de los ferríticos. No obstante, existen ferríticos con titanio o niobio que se producen bajo estrictas condiciones de laminado y recocido para evitar el “roping” y mejorar las propiedades de embutibilidad profunda.



Cilindro producido mediante embutición profunda en ferrítico estándar EN 1.4016 (arriba), mostrando el efecto de “roping” y en austenítico EN 1.4301 (abajo). El Roping no es agradable a la vista y requeriría acabado posterior a la fabricación. Puede evitarse seleccionando un ferrítico “estabilizado” (con contenido de Ti o Nb) y mediante el control estricto de los parámetros de proceso.



Contratuercas embutidas para la decoración de ruedas

De todas las piezas inoxidable utilizadas para llantas de coches y camiones, el tipo de tapa de fijador de rueda mostrado (derecha) representa uno de los mayores desafíos de conformabilidad. La forma indica un elevado grado de embutición que, en este caso, se efectúa mediante etapas sucesivas.

El acero inoxidable no sólo satisface los requisitos estéticos, sino que también ofrece una elevada resistencia y un diseño simple – el elemento consiste en una única pieza, lo que implica que no son necesarias soldaduras ni adhesivos. Tradicionalmente, estas piezas se produjeron utilizando tipos austeníticos tales como EN 1.4301 (AISI 304). No obstante, las propiedades de embutibilidad de los ferríticos son tales que estos remaches también pueden producirse con un ferrítico (EN 1.4526 – AISI 436) con contenido de cromo, molibdeno y niobio:

- este tipo es adecuado para el proceso de embutición (anisotropía, procesamiento).

- Los ferríticos en general presentan una combinación de brillo y color que resulta atractiva para los fabricantes de llantas.
- El molibdeno contribuye a la resistencia a la corrosión por picaduras (sal para el hielo y humedad).
- El niobio contribuye a eliminar el efecto “roping” (reduciendo así también el pulido posterior a la fabricación).

Debido a su pequeño tamaño, estos fijadores resultan perfectamente adecuados para el pulido en masa en tambores, que proporciona al acero inoxidable un intenso acabado brillante.

Las contratuercas de acero inoxidable pueden fijarse con adhesivo, soldarse o unirse a la tuerca. Son más fuertes que las piezas fabricadas con otros materiales de construcción. Las de inoxidable requieren un menor tratamiento posterior (tales como pintura o recubrimiento) y son totalmente reciclables.



13 Chapa ondulada para una mayor capacidad de carga



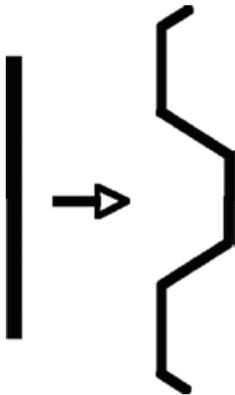
Fotografía: Lincoln Smitweld BV, Nijmegen (HL)

Los buques cisterna transportan una gran variedad de productos químicos líquidos. Las cargas típicas incluyen productos químicos, petroquímicos y alimentarios, tales como ácido fosfórico, ácido sulfúrico, derivados del petróleo, aceites vegetales y melazas. En el puerto, el producto se bombea directamente a una de las cisternas del buque, cuyo tamaño puede ser de varios miles de metros cúbicos. Normalmente cada buque contiene varios compartimentos, de modo que pueden transportar múltiples cargas.



Fotografía: Outokumpu, Degerfors (S)

Chapa de acero corrugada para aumentar la rigidez

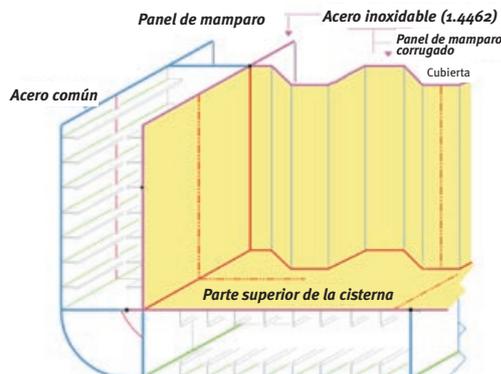


La rigidez de un componente estructural es proporcional a su momento de inercia. Este último puede incrementarse desplazando la mayor cantidad de masa posible lejos del centro de gravedad, lo que hace que una chapa ondulada fina sea un componente estructural más interesante que una placa lisa más gruesa. Una serie de compartimentos de tamaño extremadamente grandes fabricados con paredes de acero ondulado (“mamparos”) aumenta la rigidez de un barco, por ejemplo.

Los mamparos corrugados también resultan más fáciles de limpiar que los diseños tradicionales con refuerzos internos.

Líquidos corrosivos

Puesto que los buques representan una considerable inversión, deben ser lo más versátiles posible. Los tipos austeníticos EN 1.4406 (AISI 316LN), EN 1.4434 (AISI 317LN) o el dúplex EN 1.4462 se utilizan habitualmente para esta aplicación con el fin de alojar productos químicos agresivos como los mencionados anteriormente. Estos tipos con Cr-Ni-Mo no sólo son resistentes a un mayor número de productos corrosivos que los Cr-Ni, sino que también permiten unas temperaturas operativas más elevadas, aumentando la comodidad de la operación del navío durante la carga y/o la descarga.



Plano: Lincoln Smitweld BV, Nijmegen (HL)

Integridad estructural

La rigidez y la resistencia a la corrosión son propiedades necesarias, pero no son suficientes por sí mismas para dar respuesta a los desafíos de construcción que plantea un buque cisterna de 35 millones de dólares. El almacenamiento y el transporte de productos químicos están sujetos a unos estrictos códigos de fabricación de los buques utilizados para ellos. Los criterios de fallo de, por ejemplo, el chapeado, se asocian fundamentalmente al modo de fallo de los procesos de deformación plástica, lo que significa que el límite elástico ($R_{p0.2}$) del material es un criterio de selección importante.

Los dúplex ofrecen un límite elástico mucho mayor que los austeníticos y son, por lo tanto, el material de elección para los mamparos. Estos aceros hacen posible unas estructuras más ligeras, lo que a su vez incrementa la capacidad de carga.



Fotografía: Lincoln Smitweld BV, Nijmegen (HL)



Fotografía:
Cantiere Navale De Poli,
Venecia (I)

Las múltiples ventajas de los dúplex

Los aceros inoxidable dúplex poseen las mismas propiedades de conformabilidad únicas de los austeníticos, perfectamente adecuadas para las estructuras corrugadas que incrementan la rigidez de los compartimentos de los buques cisterna. Además, el elevado límite elástico de los dúplex ofrece un considerable potencial de reducción de peso, permitiendo la reducción del espesor de las paredes sin dejar de satisfacer los estrictos requisitos estructurales aplicados a la construcción de los barcos.

Por último, la combinación de cromo, molibdeno y nitrógeno hace que estos tipos resulten muy resistentes frente a la corrosión localizada como son, por ejemplo, las picaduras y las fisuras. Este hecho aumenta el número de diferentes productos químicos (con sus diversos rangos de temperatura) que puede transportar un buque, ampliando en último término la base de clientes potenciales para este tipo de bien de inversión.

14 Referencias

- [1] DE MEESTER, Paul, *Kwaliteitscontrole en mechanische eigenschappen van materialen*, 2ª ed., Leuven: Acco, 1988
- [2] LAGNEBORG, Rune, “Not only stainless but also an interesting structural material”, *Stainless steel for structural automotive applications – Properties and case studies* (Automotive Series, Volume 1, CD-ROM), 3ª ed., Luxemburgo: Euro Inox, 2006
- [3] *Stainless steel for structural automotive applications – Properties and case studies* (Automotive Series, Volume 1, CD-ROM), 3ª ed., Luxemburgo: Euro Inox, 2006, capítulo “Forming”
- [4] “Deformazione plastica a freddo dell’acciaio inossidabile”, *Inossidabile 154*, Milán: Centro Inox, 2003
- [5] *Handbook “Spinning and shear forming”*, 2ª ed., Ahlen: Leifeld Metal Spinning, 2002
- [6] *Thate gedrückte Präzision*, Preetz: Thate, 2005
- [7] “Rolvormprofileren (koudwalsen)”, *Roestvast Staal 3/2005*, Leiden: TCM, 2005
- [8] NEESSEN, Fred; BANDSMA, Piet, “Tankers – A composition in duplex stainless”, *Welding Innovation, Volume XVIII, No. 3*, Cleveland: The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, 2001
- [9] “Visit to De Poli shipyard in Venice, Italy”, *IMOA Newsletter January 2001*, Londres: International Molybdenum Association, 2001

ISBN 978-2-87997-214-5