TRATER Press
JUNIO 2017 • Nº 59
REVISTA DEL TRATAMIENTO TÉRMICO
www.pedeca.es

TRATAMIENTO TÉRMICO DE ALEACIONES DE METALES NOBLES EN ATMÓSFERA CONTROLADA

HEA
SINCE 1945
HORNOS INDUSTRIALES
www.alferieff.com • hea@hornoshea.com
Telfféfono: +34 91 639 69 11

SUB CON TRATA CIÓN'17

FERIA INTERNACIONAL
DE PROCESOS
Y EQUIPOS PARA
LA FABRICACIÓN

6/8 DE JUNIO DE 2017

IN DUS TRY

SUB CON TRATA CIÓN'17

FERRO FORMA

FITMAQ 2017

maintenance

PUMPS & VALVES

ADDIT3D

BEC
6-8/6
2017

Tel.: (+34) 94 404 00 78/93
mail: subcontratacion@bec.eu
www.subcontratacionbilbao.com

B! E! C! BILBAO EXHIBITION CENTRE

EXPOSSIBLE!

Nuestra Portada

HEA
Hornos Industriales
www.alferieff.com
hea@hornoshea.com
Tel.: 916 396 911
MADRID

Sumario • Junio 2017 - Nº 59

Información

- Fórum de ARCAS - *Por Juan Martínez Arcas* **4**
- Módulo de templado por inducción - *Por EMAG* **6**
- Insertec International Sales Meeting **8**
- MIHEU continúa invirtiendo en la tecnología SECO / WARWICK **10**
- Analizadores de oxígeno ZIRKOR de SICK **12**
- LOESCHE se reorganiza en el sector de las aplicaciones térmicas **14**
- Encuentro tecnológico de S.I.F.E. **16**
- Desarrollo y caracterización de recubrimientos láser MCrAlY para aplicaciones de barrera térmica - *Por J. C. Pereira, J. C. Zambrano, M. J. Tobar, A. J. Yáñez y V. Amigó* **18**
- La inducción en el sector de la forja: en vías de una segunda juventud - *Por Eugenio Pardo Olea, Luis Gorjón y Manuel Castro* **30**
- El cobre y sus aleaciones (Parte II) - *Por Manuel Antonio Martínez Baena* **36**

Guía de compras **47**

Índice de Anunciantes **50**

Síguenos en

Director: Antonio Pérez de Camino
Publicidad: Carolina Abuin
Administración: María González Ochoa

PEDECA PRESS PUBLICACIONES S.L.U.
Goya, 20, 1º - 28001 Madrid
Teléfono: 917 817 776 - Fax: 917 817 126
www.pedeca.es • pedeca@pedeca.es

ISSN: 1888-4423 - Depósito legal: M-53065-2007

Diseño y Maquetación: José González Otero
Creatividad: DELEY
Impresión: Villena Artes Gráficas

Redactor honorífico:
José María Palacios

Colaboradores:
Manuel A. Martínez Baena, Juan Martínez Arcas y Jordi Tartera

Por su amable y desinteresada colaboración en la redacción de este número, agradecemos sus informaciones, realización de reportajes y redacción de artículos a sus autores.

TRATER PRESS se publica seis veces al año: Febrero, Abril, Junio, Septiembre, Noviembre y Diciembre.

Los autores son los únicos responsables de las opiniones y conceptos por ellos emitidos.

Queda prohibida la reproducción total o parcial de cualquier texto o artículo publicado en TRATER PRESS sin previo acuerdo con la revista.

Asociación colaboradora
ASAMMET Asociación de Amigos de la Metalurgia

Fórum de ARCAS

Por Juan Martínez Arcas

Pueden formularnos las preguntas que deseen sobre la problemática de los Tratamientos Térmicos, dirigiéndose a la revista:

Por carta: Goya, 20, 1º - 28001 Madrid

Teléfono: 917 817 776 - Fax: 917 817 126

E-mail: pedeca@pedeca.es

Tanto preguntas como respuestas irán publicadas en sucesivos números de la revista por orden de llegada, gracias a la activa colaboración de D. Juan Martínez Arcas.

Continuamos con lo que decíamos en los dos últimos artículos, sobre facilitar el máximo de información técnica posible sobre el interesante acero especial designado como 17 – 17 – PH.

En esta ocasión, apreciaremos la gran capacidad que tiene este material en cuanto a sus características más importantes, como es su alta resistencia a la corrosión, incluso superior a los aceros típicos inoxidables, como el AISI- 420, 431 y 410.

De hecho, es comparable en cuanto a resistencia a la corrosión se refiere, con la calidad AISI-304.

Así mismo su alta resistencia a la fatiga por corrosión, además de excelentes características de mecanizado, tratamientos de baja temperatura con tiempos cortos, reducen al mínimo la deformación de las piezas y su desoxidación.

Resistencia a la Corrosión

El acero 17-4-PH, resiste el ataque corrosivo mejor que cualquiera de los aceros inoxidables, que puede templarse de forma estándar y a su vez compararse con los aceros tipo 302 y 304.

La resistencia a la corrosión de este acero especial ha sido determinada de forma exhaustiva en pruebas comparativas en laboratorios, tanto con exposición al agua de mar, como en ambientes industriales, cercanos y alejados de ambientes marinos.

En la práctica, estos resultados se han contrastado con los obtenidos en procesos industriales y sobre todo en medios corrosivos dentro de las industrias químicas, petrolíferas, papeleras, náuticas, farmacéuticas, etc.

Está confirmado que desde hace tiempo se están sustituyendo los aceros 420, 431, 410 y similares en una amplia gama de piezas, que requieren una excelente resistencia a la corrosión.

Nota importante

Se pueden facilitar a todos los que estén interesados los datos de los ensayos, así como los resultados, para ello deben solicitarlo a la Revista.

Furnaces & Refractories

Compromiso Insertec

En INSERTEC, damos soluciones innovadoras en el sector del calor industrial, diseñando y fabricando hornos industriales y refractarios a medida.

Establecemos relaciones duraderas que superan las expectativas de nuestros colaboradores.

Esta filosofía es la que marca la diferencia.

www.insertec.biz

WHERE ENGINEERING BECOMES HEAT

Etxerre Kaminoa 21 \
48970 Basauri \ Bizkaia \ Spain

Tel.: +34 - 944 409 420 (Furnaces)
+34 - 944 409 450 (Refractories)

insertec
Furnaces & Refractories

Módulo de templado por inducción

Por EMAG

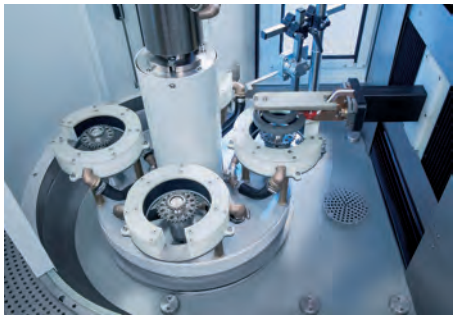
El objetivo principal que se persigue en un proceso de templado por inducción de engranes con una máquina de templado eldec MIND 750 de EMAG, consiste en lograr la máxima productividad con una calidad constante.

Dependiendo del tipo de pieza, se registran unos tiempos de ciclo de entre 4 y 8 segundos.

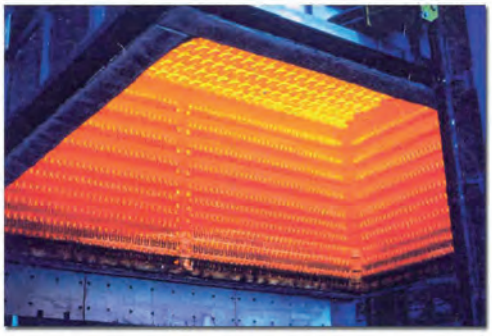
Para ello, el sistema totalmente automatizado está dotado de un sistema de rociado sincronizado con el movimiento de la pieza.

Como fuente de energía se utiliza un generador SDF® o bien un generador de alta frecuencia.

Los engranes sinterizados logran la resistencia mecánica deseada, mediante la aplicación precisa de la energía durante el proceso de templado inductivo y el revenido posterior, así como mediante el proceso de enfriamiento.



Hornos
Laboratorio e industriales



Quemadores
recuperativos y regenerativos

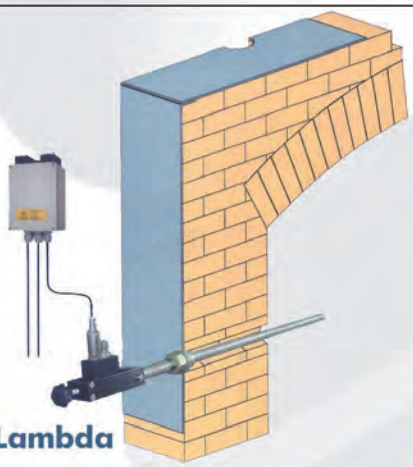
WS

Reguladores de Potencia
a Tyristores:

AEG
Power supply systems

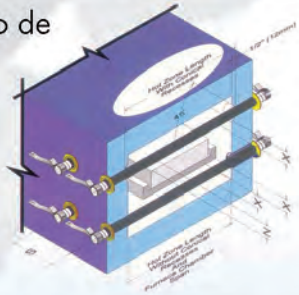
Equipos de control de atmosferas:

mesa
electronic



Sonda Lambda

Carburo de Silicio



Fabricación de resistencias,
en hilo o pletina conformadas a medida segun plano.

MoSi2 (Hasta 1800°C)

Interbil
Ingeniería Térmica Bilbao s.l.

P.I. Sangróniz, Iberre 1-M5
E-48150 SONDICA (Vizcaya)
Tel: 94 453 50 78 Fax: 94 453 51 45
bilbao@interbil.es

www.interbil.es

SYSTEM CERTIFICATION ISO 9001:2000 SGS ACREDITADO POR ENAC

INSERTEC International Sales Meeting

Este mes de Mayo 2017 hemos celebrado la reunión de ventas con la presencia de toda la red de agentes y distribuidores. Este evento se ha celebrado por primera vez en nuestras nuevas instalaciones de Basauri ubicadas en Etxerre Kaminoa 21, donde INSERTEC ha agrupado la fabricación de hornos industriales y piezas conformadas.

Han sido cuatro días muy intensos donde hemos compartido experiencias y conocimiento tecnológico, que nos permitirán afrontar los retos que demanda el sector metalúrgico de forma consensuada.

Al mismo tiempo, hemos aprovechado para presentar el nuevo logo INSERTEC.

Pretendemos establecer una marca que una a todos los grupos de interés que trabajamos conjuntamente, dando soluciones cada vez más integradoras a nuestros clientes.

Es tiempo de comunicar no sólo lo que hacemos, sino cómo lo hacemos y porqué.

Nuestra nueva marca pretende ser el reflejo de nuestra manera de hacer las cosas y nuestra apuesta de futuro.

HORNOS DE INDUCCIÓN

PARA FORJA INDUCTOFORGE DE INDUCTOTHERM

I-HAZ
MAXIMIZA EL CONTROL DEL PROGRESO

MODO STAND-BY:
MINIMIZA LOS RECHAZOS EN PARADAS Y ARRANCADAS

INDUCTOTHERM GROUP | IBERIA

Alta productividad y alta seguridad para su forja

ONDARLAN, S.L.:
+34 943 635079
o visite: www.ondarlan.com
email: oficina@ondarlan.com
I.P. Videoconferencia: 88.2.227.10

MIHEU continúa invirtiendo en la tecnología SECO / WARWICK

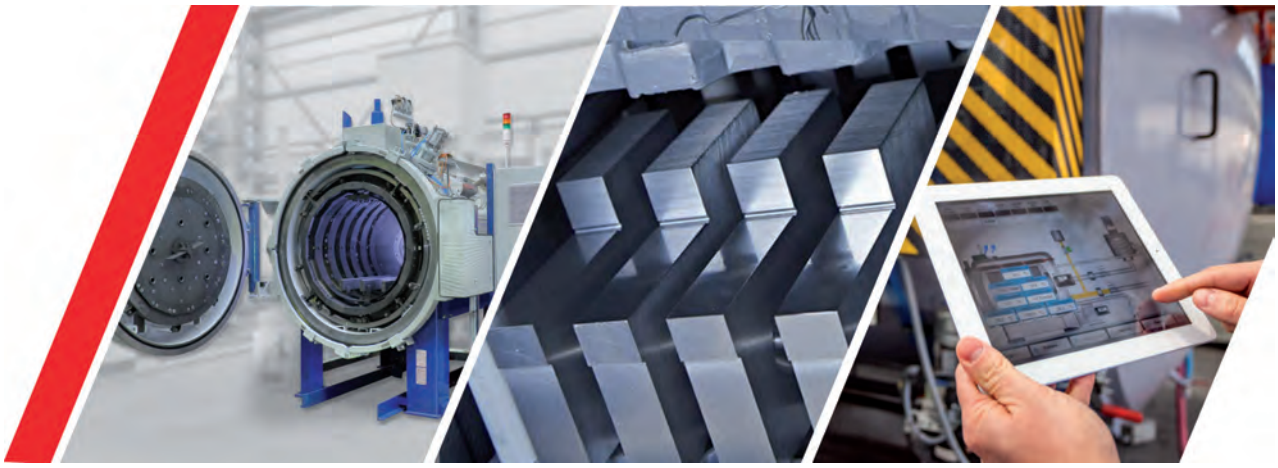
El VECTOR es un horno de vacío modular equipado con alta presión de gas quench (HPGQ). Ha sido utilizado desde hace más de 20 años por empresas profesionales de tratamiento térmico de todo el mundo, como MIHEU, el tratamiento de calor comercial esloveno, que utiliza el sistema Vector para aumentar la producción y garantizar un trabajo de alta calidad con resultados resaltables.

VECTOR fue la primera solución SECO / WARWICK instalada por MIHEU. Anteriormente, la empresa eslovena compró un horno equipado con tecnología de firma de SECO / WARWICK, ZeroFlow, para nitrocarburación y nitruración controlada de gas.

La satisfacción con la eficiencia, experiencia y experiencia de este equipo fueron la base para la continua cooperación de MIHEU y la compra de otro equipo adicional. En el primer trimestre de este año, MIHEU compró el sistema VECTOR, que se entregará entre el 3º y 4º trimestre de 2017.

"El centro de tratamiento térmico de MIHEU es una empresa familiar que comenzó su operación desde un pequeño taller. Actualmente goza de una fuerte presencia internacional y el alcance de sus servicios está en constante expansión. Sin embargo, lograr estos resultados no sería posible sin la cooperación de socios fiables que ofrecieran buenas, sólidas e innovadoras soluciones", dijo Aleš Prikeržnik, Director Gerente de MIHEU.

Ciclos más cortos, mayor eficiencia y control preciso de los procesos, son sólo algunos de los beneficios de los hornos de vacío de alta presión SECO / WARWICK utilizados en todo el mundo.



JORNADA TÉCNICA DE TRATAMIENTO TÉRMICO 2017

TECHNICAL SESSION ON HEAT TREATMENT

23 de Noviembre 2017
IK4-AZTERLAN (Durango)
Auditorio

tabira Instituto de Fundición

WFO

IK4 AZTERLAN Research Alliance

MEDIA PARTNER

TRATER Press

Solicitud de información del evento, mediante email a info@iftabira.org

Analizadores de oxígeno ZIRKOR de SICK

Los nuevos analizadores de oxígeno de la serie ZIRKOR son extremadamente robustos y combinan un alto nivel de calidad con un rendimiento sin precedentes. Su precisión permite optimizar con absoluta fiabilidad los procesos de combustión a través de un manejo sencillo. Puesto que hacen la medición directamente tras la combustión, el valor de oxígeno se ajusta al combustible de forma óptima.

Medir el oxígeno con fiabilidad es tan importante para el control de un proceso de combustión optimizado, como lo es para la supervisión de las emisiones. Siendo esta una de las aplicaciones más exigentes dentro de la automatización de procesos industriales, el analizador debe ser fácil de integrar y, ante todo, resistente. No obstante, lograr una combustión óptima depende de una dosificación perfecta. Una cantidad insuficiente de oxígeno provoca una combustión incompleta y, por tanto, mayores emisiones de CO. Por el contrario, un volumen excesivo de oxígeno genera una gran pérdida de calor a través de los gases de escape.

La serie ZIRKOR proporciona un valor de referencia de oxígeno para la medición de emisiones, por lo que garantiza unos resultados de medición fiables. Se encuentra disponible en tres versiones: ZIRKOR100 para instalaciones pequeñas, ZIRKOR200 para grandes instalaciones de combustión y ZIRKOR302 para el ajuste sin gas de prueba.

Robustez, uso sencillo y análisis precisos

El ZIRKOR100 es extremadamente robusto gracias a su innovadora tecnología de células. La función integrada

de diagnóstico de células reduce la necesidad de mantenimiento, puesto que se puede acceder a distancia a toda la información importante a través de la aplicación ZIRKOR Remote.

El ZIRKOR200 es un analizador de alta tecnología fácil de conectar. Funciona sin problemas a temperaturas ambiente de hasta 1.600 °C y se calibra automáticamente. La variedad de longitudes de lanza y la gran cantidad de interfaces permiten su instalación en las más diversas instalaciones y aplicaciones. La variante de hasta 600 °C cuenta, además, con la certificación EN 15267.

El ZIRKOR302 se diferencia de las otras versiones principalmente por la calibración automática utilizando aire ambiente. El acreditado principio de sondas de corriente no requiere gases de prueba y proporciona una medición duradera e increíblemente precisa, incluso a altas temperaturas. Está disponible opcionalmente con bomba de gas de medición o con eyector de aire comprimido.

TRATERMAT

Congreso Internacional de
Tratamientos Térmicos y de Superficie

2017

DEL 3 AL 6 DE OCTUBRE 2017

CAMPUS CIENTÍFICO Y TECNOLÓGICO DE LINARES

INSCRÍBETE EN WWW.TRATERMAT2017.ES

MECENAZGO

cetemet CENTRO TECNOLÓGICO METALMECÁNICO Y DEL TRANSPORTE

AYUNTAMIENTO de LINARES

Universidad de Jaén

EPSL

ENTIDADES EXPOSITORAS

LASERSCAN 3DScanners&Printers

GRUPOSICNOVA

NEURTEK instruments

ENTIDADES COLABORADORAS

TRATER

GRUPO ttc

Interempresas

LOESCHE se reorganiza en el sector de las aplicaciones térmicas

En el futuro, el grupo LOESCHE agrupará sus actividades en el sector de sistemas de combustión e instalaciones de secado, de forma centralizada en su sede principal bajo la denominación "LOESCHE Thermal Applications". Además de los conocidos generadores de gas caliente (LOMA®, HGG), el negocio incluye sistemas de combustión para combustibles sólidos, líquidos y gaseosos, así como todas las instalaciones de secado para las más variadas aplicaciones industriales. Mediante la agrupación de las competencias clave en el sector de las aplicaciones térmicas, el grupo aspira a reforzar su posición en el mercado. Con los recursos de ingeniería ubicados en la sede principal de Düsseldorf, en el futuro se podrán llevar a la práctica de forma centralizada, soluciones de instalaciones globales optimizadas y eficientes para clientes siguiendo el estándar de calidad de LOESCHE.

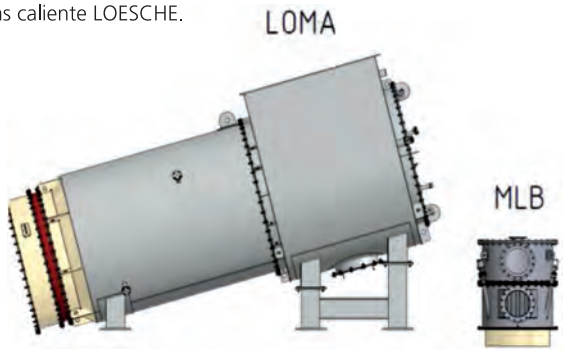
Asimismo, la agrupación de comercialización, desarrollo de proyectos, compras, tecnología de procesos y desarrollo con un banco de pruebas propio para quemadores en el centro técnico interno, también contribuyen a alcanzar este objetivo.

Los generadores de gas caliente LOESCHE (HGG) se llevan instalando con éxito en todo el mundo desde hace décadas en el sector del cemento y las centrales eléctricas. También en otros procesos de secado industrial como en los hornos y secadores de lecho fluidificado, así como en secadores rápidos para calentar aire fresco o gases de retorno.

Al contrario de los sistemas de quemadores refractarios, los generadores de gas calieinte de LOESCHE se caracterizan por unas cámaras de combustión de acero probadas y resistentes a las altas temperaturas, que permiten adaptar flujos térmicos prácticamente sin demoras o fisuras cuando se producen cambios en la potencia. Esto significa que no hay fases de calentamiento de ningún tipo, que apenas se produce intercambio térmico con el entorno y que se consigue una eficiencia energética elevada, gracias a procesos termotécnicos de diseño óptimo. En todo el mundo han demostrado su eficacia más de 640 generadores de gas caliente LOMA® para combustibles gaseosos, líquidos y en forma de polvo, con temperaturas de salida de gas caliente de hasta 750°C y potencias térmicas nominales que abarcan desde los 0,5 MW hasta los 60 MW.

Además, las cámaras de combustión de acero LOESCHE también funcionan en combinación con un quemador multilanza (MLB) patentado y desarrollado por LOES-

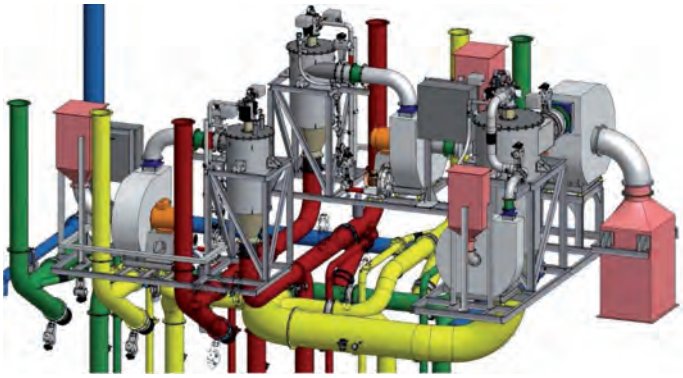
Productos LOESCHE en el sector de las aplicaciones térmicas: generador de gas caliente LOESCHE.



CHE: un desarrollo especial para la combustión de gases pobres. Este se caracteriza por una llama corta con combustión estable y un rango de regulación amplio de hasta 1:70, lo que permite una combustión completa de gas pobre sin llama de soporte. En todo el mundo más de 50 MLB de este tipo operan con total éxito.

Los perfeccionamientos técnicos de los sistemas de quemadores tiene lugar en el banco de pruebas de quemadores interno en el centro técnico de LOESCHE; actualmente tiene lugar una ampliación para combustibles sólidos como carbón o polvo de madera. Así, recientemente se ha podido instalar en Asia un primer generador de gas caliente LOMA® alimentado con polvo de carbón con una potencia de 30 MW, que utiliza el polvo de carbón como combustible principal.

Gracias a la colaboración de la empresa LOESCHE con A TEC GRECO Combustion Systems Europe GmbH, –una sinergia de competencias en el sector de la tecnología de la combustión–, podremos presentar a clientes de todo el mundo soluciones altamente eficientes allí donde necesiten generar calor de proceso. Con generadores de gas caliente refractarios se pueden alcanzar temperaturas incluso superiores a los 750 °C.



Por otro lado, la empresa LOESCHE GmbH no sólo está capacitada para suministrar generadores de gas caliente, sino que también está perfectamente capacitada para planificar y fabricar instalaciones de procesos térmicos complejos.

Un ejemplo de esto son las instalaciones de generadores de gas caliente para el cliente MANFRED BLIND GmbH. Desde 2012 se han llevado a cabo más de 10 instalaciones de diferentes tipos. La imagen superior muestra la última generación del tipo de instalación suministrada en febrero de 2017.

Encuentro tecnológico de S.I.F.E.

El pasado 5 de mayo de 2017 Sife, la Sociedad de Industrias de Forja por Estampación que cumple 40 años de vida, celebró en su sede de Bilbao, su Encuentro Tecnológico Trimestral titulado "Hornos de Inducción en Forja". Esta edición, que constituye la segunda en este año, se ha dedicado a cómo el calentamiento por inducción influye en los procesos industriales de forja, ya sea en caliente o semicaliente.

La participación en el Encuentro Tecnológico fue de un total de diecinueve personas, pertenecientes a siete empresas del sector (Alcorta Forging Group, CIE Legazpi, Codeam, Copreci, Forjas de Berriz, Riogalindo y Rothenberger), cubriendo la forja de materiales férricos y no férricos, más las dos empresas proveedoras de hornos de inducción, INDUCTOTHERM GROUP IBERIA - ONDARLAN y la italiana CEFI - Costruzioni Elettromeccaniche Forni Induzione.

La metodología de trabajo de estos Encuentros Tecnológicos se basa en una mesa de trabajo en la que todos participan, ya sean representantes de los proveedores

de equipamiento tecnológico o personas responsables de esos equipamientos en las empresas de forja.

El objetivo es un enfoque hacia la resolución de problemas, a partir del planteamiento conjunto de situaciones reales en planta.

Dentro de estos problemas habituales en las plantas de las forjas se trataron, entre otras:

- Pasado, presente y futuro de los hornos de inducción: tipos de hornos y su correcta aplicación.
- La refrigeración como requisito de productividad.
- Flexibilidad en el cambio de bobinas y frecuencia de funcionamiento.
- Problemática en cuanto a parada temporal de un horno de inducción, para volver a arrancar.
- Mantenimiento de los hornos de inducción.

Tras las tres horas de intenso trabajo, los asistentes continuaron con una comida de trabajo en la que pudieron hablar de tú a tú con aquellas personas que más eran de su interés.

En resumen, el objetivo de este Encuentro Tecnológico no fue otro que el de poder compartir conocimientos en cuanto a hornos de inducción, mediante la puesta en común de problemas en planta, contando con expertos de las empresas proveedoras, para la resolución de gran parte de los problemas y con técnicos de las empresas asistentes, que pudieron debatir muchos de esos aspectos.

Desarrollo y caracterización de recubrimientos láser MCrAlY para aplicaciones de barrera térmica

Por J. C. Pereira * (1,2), J. C. Zambrano (2), M. J. Tobar (3), A. J. Yáñez (3), V. Amigó (1)

Resumen

El proceso de plaqueado láser coaxial es una versátil herramienta para la obtención de recubrimientos de calidad, logrando la completa fusión y deposición de aleaciones con elevado punto de fusión sobre superficies 3D complejas. En este trabajo se han estudiado los parámetros de procesado láser coaxial de superaleaciones MCrAlY (donde M = Ni, Co, Fe o combinaciones entre ellos), comúnmente empleadas como recubrimientos de anclaje en sistemas de barrera térmica, ente ellas: NiCoCrAlY y CoNiCrAlY; logrando seleccionar una combinación de parámetros que permiten obtener recubrimientos por solape de cordones con adecuada relación de aspecto, mínima dilución, bajo nivel de porosidad y buena unión metalúrgica con el sustrato de acero inoxidable austenítico, utilizando un equipo láser Nd:YAG de 2.2 kW y un cabezal coaxial. Los recubrimientos obtenidos han sido caracterizados microestructuralmente con diversas técnicas, logrando identificar las fases que los constituyen y el tipo de microestructura obtenida con el procesado láser coaxial. Se han determinado sus propiedades mecánicas a través ensayos de microindentación y nanoindentación. Se ha estudiado también el comportamiento de oxidación a alta temperatura de los recubrimientos y del acero inoxidable austenítico mediante ensayos de oxidación isotérmica a 1.100 °C. Los resultados indican que el plaqueado láser coaxial puede ser una buena alternativa a los procesos de proyección térmica, ya que se mejora la integridad microestructural, se disminuyen los defectos como la porosidad y la falta de unión metalúrgica, mejorando también el comportamiento ante la oxidación y el desgaste a elevadas temperaturas de los recubrimientos de anclaje MCrAlY, que pueden ser utilizados en nuevos sistemas de barrera térmica.

(1) Instituto de Tecnología de Materiales, Universidad Politécnica de Valencia, España.

(2) Centro de Investigaciones en Mecánica CIMEC, Universidad de Carabobo, Venezuela.

(3) Departamento de Ingeniería Industrial II, Universidade da Coruña, Campus Ferrol, España.

1. Introducción

Los componentes aeronáuticos y en turbinas de generación eléctrica se protegen con capas barrera con aleaciones MCrAlY (donde M=Ni, Co, Fe o combinaciones entre ellas). Las superaleaciones base níquel del tipo NiCoCrAlY y las base cobalto del tipo CoNiCrAlY son ampliamente usadas como recubrimiento de piezas y como capa de unión entre sustrato y recubrimientos cerámicos, debido a su buena adherencia, alto módulo de elasticidad y resistencia, y a su buena resistencia a la oxidación a alta temperatura, por ello se usan cada vez más en componentes mecánicos dentro de los modernos motores de turbina de gas [1].

El laser cladding (LC) es una técnica de manufactura flexible que permite depositar cordones y también recubrimientos densos, capa a capa sobre superficies complicadas [2], con la finalidad de realizar reparaciones en componentes de alto coste, así como también incrementar la vida en servicio de componentes sometidos a desgaste o a altas temperaturas. En el proceso de depo-

sición por láser el polvo metálico se inyecta en una piscina de masa fundida, producida por un haz láser de alta intensidad. Para lograr un adecuado recubrimiento con esta técnica se deben controlar diversos parámetros en el proceso, tales como: la potencia del láser, velocidad de avance del cabezal, caudal de polvo aportado y gas de protección. Todas estas variables influyen en la calidad del recubrimiento obtenido, la adherencia con el sustrato y la dilución de los elementos presentes [3]. A altas temperaturas, la mayoría de los metales inevitablemente se oxida con una amplia gama de condiciones, y pueden esperarse diversas interacciones entre los materiales de sustrato y la atmósfera, como la difusión, inter-difusión, descomposición, volatilización y el crecimiento térmico de la capa de óxido [4]. La capa de óxido generada en algunos casos puede actuar como barrera protegiendo al recubrimiento y sustrato. La ganancia de peso y el espesor de la capa de óxido superficial son parámetros importantes en el comportamiento de recubrimientos MCrAlY a alta temperatura. La oxidación de los metales también puede influir en el proceso de desgaste y los mecanismos de daño [5]. El comportamiento de oxidación del recubrimiento puede ser altamente influenciado, tanto por las propiedades del recubrimiento tales como la porosidad y por la oxidación, y la distribución de los constituyentes MCrAlY durante el proceso de deposición [6]. De hecho, las capas de óxido en aleaciones MCrAlY no son únicamente de α-Al_2O_3, también puede contener inclusiones de óxido ricos en Y, además de otros óxidos como Cr_2O_3, NiO, CoO o óxidos espinela del tipo $(Ni,Co)(Cr,Al)_2O_4$ [7-10]. El objetivo del presente trabajo ha sido desarrollar recubrimientos MCrAlY obtenidos mediante plaqueado láser coaxial sobre un acero inoxidable AISI 304 y evaluar su microestructura, propiedades mecánicas y comportamiento a alta temperatura.

2. Procedimiento Experimental

2.1 Materiales y procesado láser coaxial

Se utilizaron polvos MCrAlY prealeados, atomizados por gas y suministrados por Oerlikon Metco (Amdry 365-2 y 995C). La aleación NiCoCrAlY se compone principalmente de Ni con 23% de Co, 17% de Cr, 12% de Al, y 0.42% Y, y un diámetro de tamaño medio de partícula de 55 micras. La aleación CoNiCrAlY se compone de Co con 32% de Ni, 21% Cr, 8% de Al, y 0.45% y, con tamaños de partícula con diámetro medio de 65 micras. El sustrato es un acero inoxidable laminado en frío AISI 304 de 10 mm de espesor. Recubrimientos extensos (30 x 30 mm^2) se obtuvieron usando un láser Nd:YAG de estado sólido (Rofin-Sinar DY 022) en modo continuo, con una potencia máxima de 2.2 kW y una longitud de onda de 1.064 nm. La potencia (P) utilizada en este estudio ha sido de 2.2 kW. El diámetro del haz (D) focalizado en la lámina es de 4 mm. El movimiento XYZ se consigue mediante un robot con 6 grados de libertad (ABB IRB 2400), la velocidad (V), de 15 mm/s, con una superposición o solape de cordones al 40%. Polvo suministrado por unidad de longitud de 25 mg/mm provisto de una boquilla coaxial anular (Precitec YC50) y un alimentador de polvo Sulzer Metco Twin 10-C. Como gas portador del polvo se ha utilizado Helio (20 L/min) y como gas auxiliar se ha utilizado Argón (15 L/min).

2.2 Ensayos y técnicas de caracterización

Las partículas de polvos prealeados y los recubrimientos han sido analizadas mediante microscopía, empleando un microscopio óptico Nikon LV100 y un microscopio electrónico de barrido con emisión de campo (FESEM) Zeiss ULTRA55. Para la determinación del tamaño de partícula del polvo se ha utilizado un difractómetro láser Malvern Mastersizer 2000, empleando el método de intensidad de luz difractada por las partículas suspendidas en agua destilada. Se ha realizado microanálisis por espectroscopía de energía dispersiva (EDS) para la cuantificación de composición química, utilizando un detector de rayos X Oxford Instruments instalado en el microscopio electrónico. Para la medición de la dureza en el recubrimiento y el sustrato se utilizó un microdurómetro Shimadzu HMV-2 asistido con software de medición automático de la huella. Las mediciones fueron realizadas con una carga de 980.7 mN y un tiempo de aplicación de 10 s (escala HV0.1), la separación entre huellas fue de 100 µm (en las mismas zonas analizadas por EDS) y la primera medición se hizo a 50 µm de la superficie o borde del recubrimiento. Se promediaron los valores obtenidos de tres indentaciones para cada zona. Los ensayos de oxidación isotérmica se realizaron a 1.100 °C hasta 200 h en aire estático en un horno GALLUR MC-1. Diferentes muestras oxidadas se retiraron del horno a intervalos diferentes: 5, 10, 25, 50, 100 y 200 h, y se enfriaron al aire hasta temperatura ambiente. Para el análisis de la morfología de los cristales de óxido en la superficie oxidada, se ha utilizado un microscopio de fuerza atómica (AFM) marca Veeco modelo Multimode en modo tapping. También se ha observado la superficie oxidada en el microscopio electrónico de barrido y se han realizado análisis de composición química con EDS.

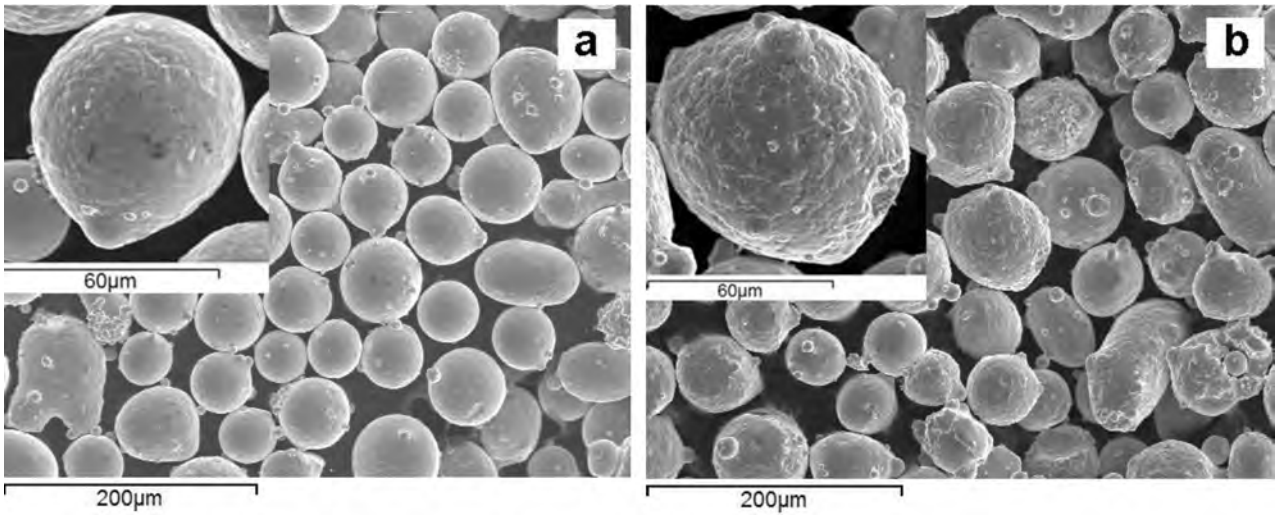


Figura 1. Micrografías SEM (20 kV BSE) de polvos MCrAlY a) morfología del polvo NiCoCrAlY y b) morfología del polvo CoNiCrAlY.

3. Resultados y su discusión

Los dos polvos prealeados utilizados tienen una morfología esférica (Fig. 1a y 1b), típica del proceso de atomización con gas. La morfología y el tamaño del polvo son muy importantes para el procesamiento por láser cladding coaxial, debido a que la mayor fluidez del polvo permite un recubrimiento de calidad y homogéneo. En cada uno de los polvos se encuentran dos fases diferentes, de acuerdo con análisis por DRX realizados en muestras de los polvos: γ-Ni(Cr)/Co(Ni,Cr) y β-NiAl/(Co, Ni)Al dependiendo del elemento base de cada aleación.

Muchas variables están involucradas en el proceso de revestimiento por láser coaxial, por lo que se debe estudiar la geometría y la dilución de cordones sencillos, antes de obtener recubrimientos extensos por solape de cordones. En trabajos previos [11, 12], se estudiaron los parámetros de revestimiento por láser coaxial en una aleación NiCoCrAlYTa para obtener una adecuada relación de aspecto, baja dilución y una buena unión metalúrgica con el sustrato. En este estudio se ha combinado, para recubrimientos extensos por solape de cordones (al 40%), una alta velocidad, alta tasa de alimentación de polvo y alta potencia láser. La energía láser específica (36.67 J/mm^2) de esta combinación de parámetros y un foco del haz láser de 4 mm de diámetro, ha permitido obtener recubrimientos adecuados con las aleaciones MCrAlY en una placa de acero inoxidable austenítico AISI 304. Los recubrimientos poseen una baja dilución y porosidad, además de la ausencia de grietas u otros de-

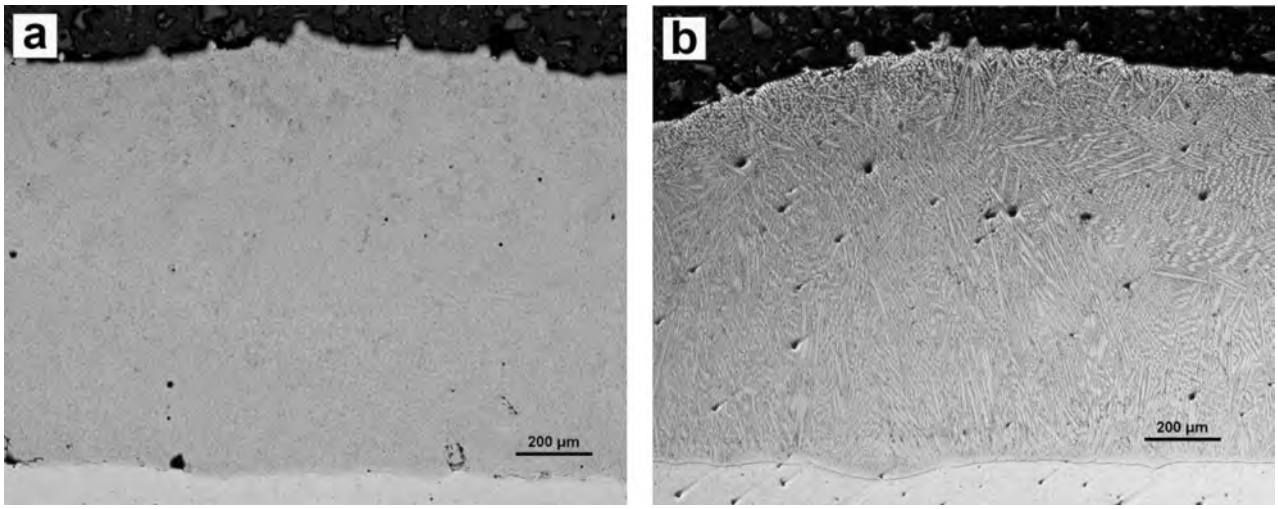


Figura 2. Micrografías ópticas de los recubrimientos láser en estado inicial a) NiCoCrAlY y b) CoNiCrAlY.

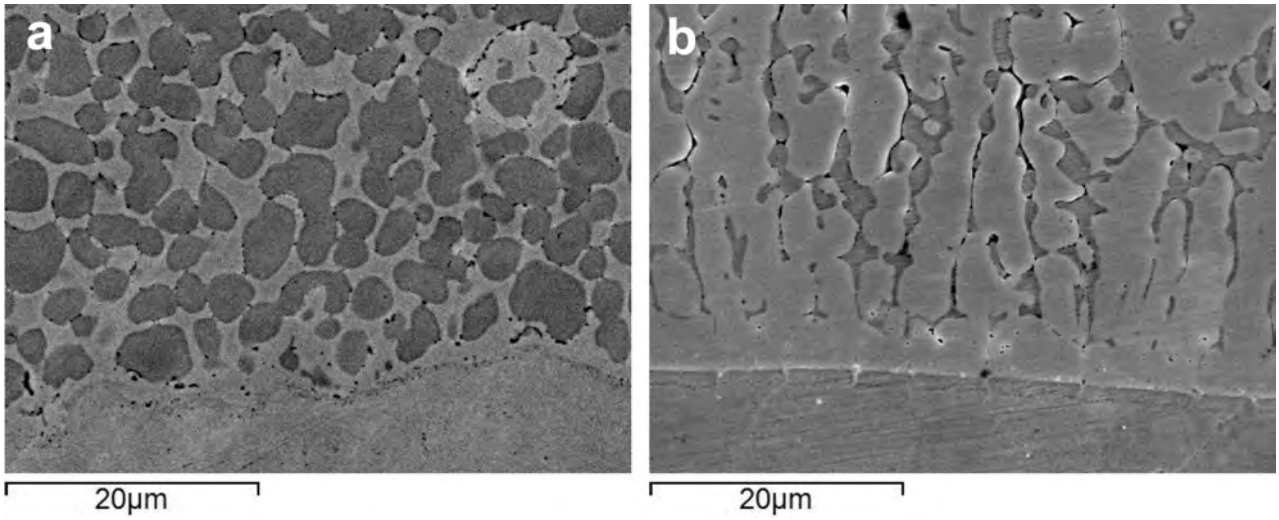


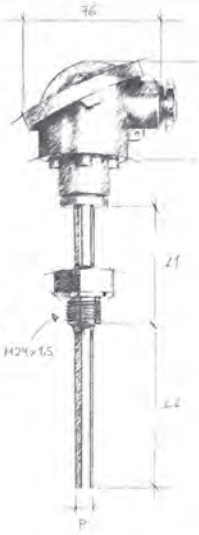
Figura 3. Micrografías SEM de la zona de interfase/recubrimiento (20 kV BSE) a) Recubrimiento láser NiCoCrAlY y b) Recubrimiento láser CoNiCrAlY.

fectos. El espesor del recubrimiento láser CoNiCrAlY es de 715±32 µm (Fig. 2a), mientras que el espesor inicial del recubrimiento láser NiCoCrAlY es de 832±45 µm (Fig. 2b).

La microestructura de los recubrimientos se compone de una fase matriz γ y una segunda fase β. El recubrimiento NiCoCrAlY tiene una estructura dendrítica celular (Fig. 3a), el microanálisis por EDS revela una fase ma-

FABRICACIÓN SENSORES DE TEMPERATURA

- Fabricación propia de Termopares y Termoresistencias.
- Especializados en tratamientos térmicos.
- Fabricación especial AMS-27850-E.
- Fabricación especial para hornos de vacío.
- Condiciones especiales para fabricantes de hornos.



LABORATORIO CALIBRACIÓN in situ

- Laboratorio acreditado ENAC en temperatura, in-situ y en nuestras instalaciones.
- Calibración de instrumentación, sensores de temperatura y hornos (TUS y SAT).
- Especialización en AMS-2750-E.
- Control de periodicidades entre calibraciones.
- Plataforma de certificados on-line.
- NUEVO servicio de calibración de transmisores de vacío in situ y en nuestro laboratorio.

SCI Suministro y Calibracion Industrial s.l.

www.sciempresa.com

Ribera de Axpe 11, D2, L203, 48950 Erandio - Vizcaya • Tel. +34 944765276 • Fax: +34 944766021 • e-mail: sci@sciempresa.com

triz de γ-Ni con Cr y Co en solución sólida y la fase interdendrítica β-NiAl (oscura) rica en Al y Co en solución sólida, junto a zonas ricas en Ni-Y en límites de grano γ/β. En el recubrimiento CoNiCrAlY se observa una estructura dendrítica columnar con frente de solidificación plana (Fig. 3b). En este caso, la fase interdendrítica está en menor cantidad debido al menor contenido de Al en esta aleación. El análisis por EDS también sugiere una solidificación hipoeutéctica con γ-Co(Ni,Cr) y una fase interdendrítica β-(Co,Ni)Al. Análisis de DRX realizados confirman las microestructuras γ/β en ambos recubrimientos.

En orden de dureza, el recubrimiento NiCoCrAlY es el más duro (duplica la dureza del sustrato), seguido por el recubrimiento CoNiCrAlY, y por último el sustrato, tal como se muestra en la gráfica del perfil de microdureza de la figura 4. El comportamiento de la dureza desde la superficie hasta el sustrato es más estable en el recubrimiento NiCoCrAlY, debido a que su microestructura es uniforme, a diferencia del recubrimiento CoNiCrAlY en los cuales hay un incremento del tamaño de las interdendritas hacia la superficie, incluso con un cambio de dendrita columnar a dendrita celular. No es casualidad que el contenido de aluminio en cada aleación siga el mismo orden, es decir, la aleación NiCoCrAlY tiene mayor cantidad de aluminio (12.5% en peso) que la aleación CoNiCrAlY (8%), lo cual modifica la microestructura obtenida en el proceso de plaqueado láser utilizado, estabilizando la fase β rica en aluminio, la cual tiene una mayor dureza que la fase γ [13], esto sin considerar la influencia de los otros elementos que conforman la aleación, lo cual influye directamente en esta importante propiedad mecánica.

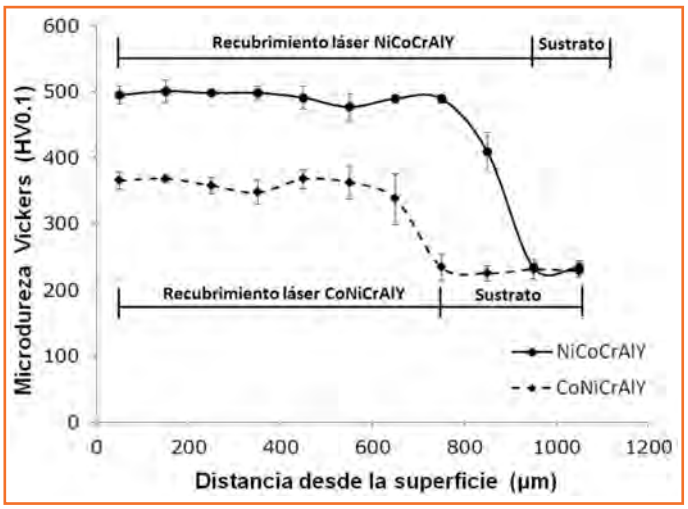


Figura 4. Perfil de microdureza en los recubrimientos y el sustrato.

Si se compara la cantidad de fase β medida en diferentes zonas de los recubrimientos γ/β (NiCoCrAlY y CoNiCrAlY) mediante procesamiento de las imágenes obtenidas con microscopía electrónica de barrido, se obtiene que la cantidad de fase β en el recubrimiento NiCoCrAlY, triplica a la cantidad encontrada en el recubrimiento CoNiCrAlY (Fig. 5), aun cuando el incremento del contenido del aluminio es sólo del 50% en el recubrimiento base níquel. Esto ratifica que en el procesado láser coaxial de estas aleaciones el aluminio estabiliza la fase β en los espacios interdendríticos al final de la solidificación y por lo tanto se incrementa la dureza en el recubrimiento con mayor contenido en aluminio.

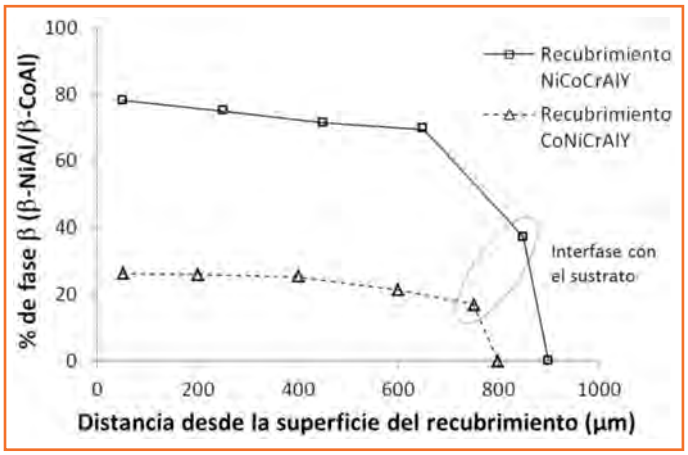


Figura 5. Evolución de la cantidad de fase β en recubrimientos láser MCrAlY con microestructura γ/β.

No hay grietas o desconchado (espalación) de la superficie oxidada de los recubrimientos después de los ensayos de oxidación isotérmica a 1.100 °C durante 200 horas en aire estático.

El aumento de peso de la superficie en función del tiempo en el recubrimiento NiCoCrAlY es mayor que en el recubrimiento CoNiCrAlY, tal como se observa en la figura 6, pero 50 veces menor que la ganancia de peso del sustrato (0.8184 mg/mm^2 para 200 horas a 1.100 °C en el acero AISI 304).

Esto induce a que un mayor espesor de la capa de óxido formada por efecto de la temperatura y atmosfera se ha generado en el recubrimiento NiCoCrAlY, lo cual puede considerarse como bueno, si la capa formada protege adecuadamente al mismo recubrimiento y al sustrato ante condiciones de servicio equivalentes. El aumento de peso puede ser representado como una curva potencial creciente en función del tiempo de oxidación, esto indica que el crecimiento del óxido va acompañado de una disminución de la velocidad de oxidación, típico de

un crecimiento de óxidos que está regido por la difusión de iones o elementos a través de la capa inicial formada rápidamente, se puede ver que además de tener una menor ganancia de peso, el recubrimiento CoNiCrAlY tienen un exponente menor en la ecuación de ganancia de peso (Fig. 6), lo que indica un crecimiento más estable de la capa de óxido en función del tiempo de oxidación.

La morfología de la superficie oxidada es diferente para cada uno de los recubrimientos láser. La capa de óxido formada en el recubrimiento NiCoCrAlY tiene una rugosidad baja y cristales regulares más pequeños (probablemente granos columnares de α-Al_2O_3) de acuerdo a lo observado en las imágenes de microscopía de fuerza atómica (Fig. 7a).

Como referencia, las muestras de recubrimiento NiCoCrAlY oxidadas hasta 100 horas, tienen una rugosidad superficial (Ra) de 0.29 µm y una altura máxima en los cristales de óxido superficiales de 2.078 nm, de acuerdo con los resultados obtenidos con AFM en la superficie de la cascarilla.

El recubrimiento base Cobalto presenta un comportamiento ante la oxidación diferente, con una superficie irregular con grandes cristales (Fig. 7b), aunque rodeados de una superficie mucho más compacta que la observada en el recubrimiento base níquel oxidado.

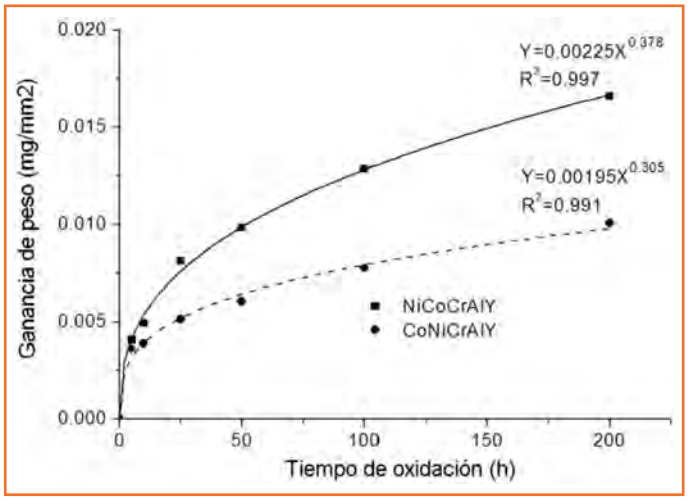


Figura 6. Ganancia de peso superficial en los recubrimientos oxidados.

La superficie oxidada de la muestra NiCoCrAlY después de 200 horas a 1.100 °C muestra un aspecto bastante densa y homogénea con algunas inclusiones visibles co-

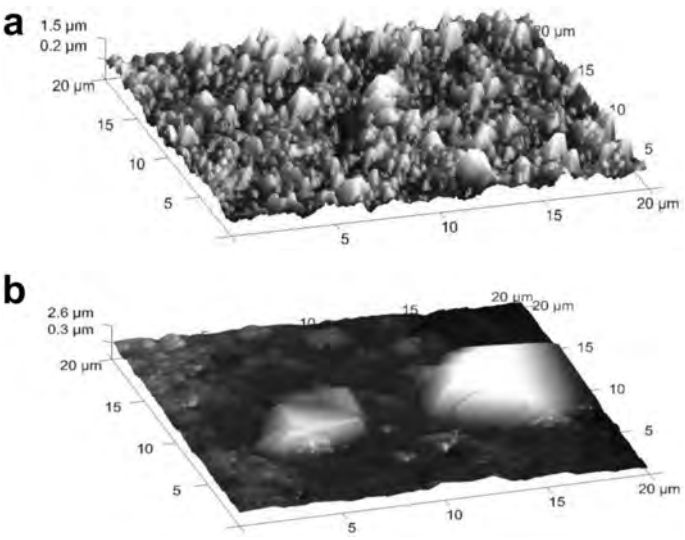


Figura 7. Morfología de la superficie oxidada (100 h a 1.100 °C) obtenida por AFM en a) recubrimiento NiCoCrAlY y b) recubrimiento CoNiCrAlY.

mo objetos brillantes (Fig. 8a). Análisis EDS indican una capa de óxido de Al_2O_3 continua con óxidos NiO, CoO, Y_2O_3 y Cr_2O_3 distribuidos al azar sobre la superficie. NiO, CoO y Cr_2O_3 posiblemente se combinan para formar óxidos espinela del tipo (Ni,Co)(Al,Cr)2O4 [14].

La composición de óxidos (tipos y porcentaje en peso) se dedujo por cálculos estequiométricos, normalizadas a partir de las mediciones por EDS en la superficie oxidada.

Ello permitió obtener la evolución en el tiempo de los componentes de la capa de óxido, que se muestra a la derecha de la micrografía de la superficie oxidada (Fig. 8b).

Se observa un rápido aumento de la relación de Al_2O_3, presumiblemente debido al gran contenido de Al en la aleación que inhibe el crecimiento de óxidos de Ni, Co y Cr. A 200 h, la Al2O3 representa aproximadamente el

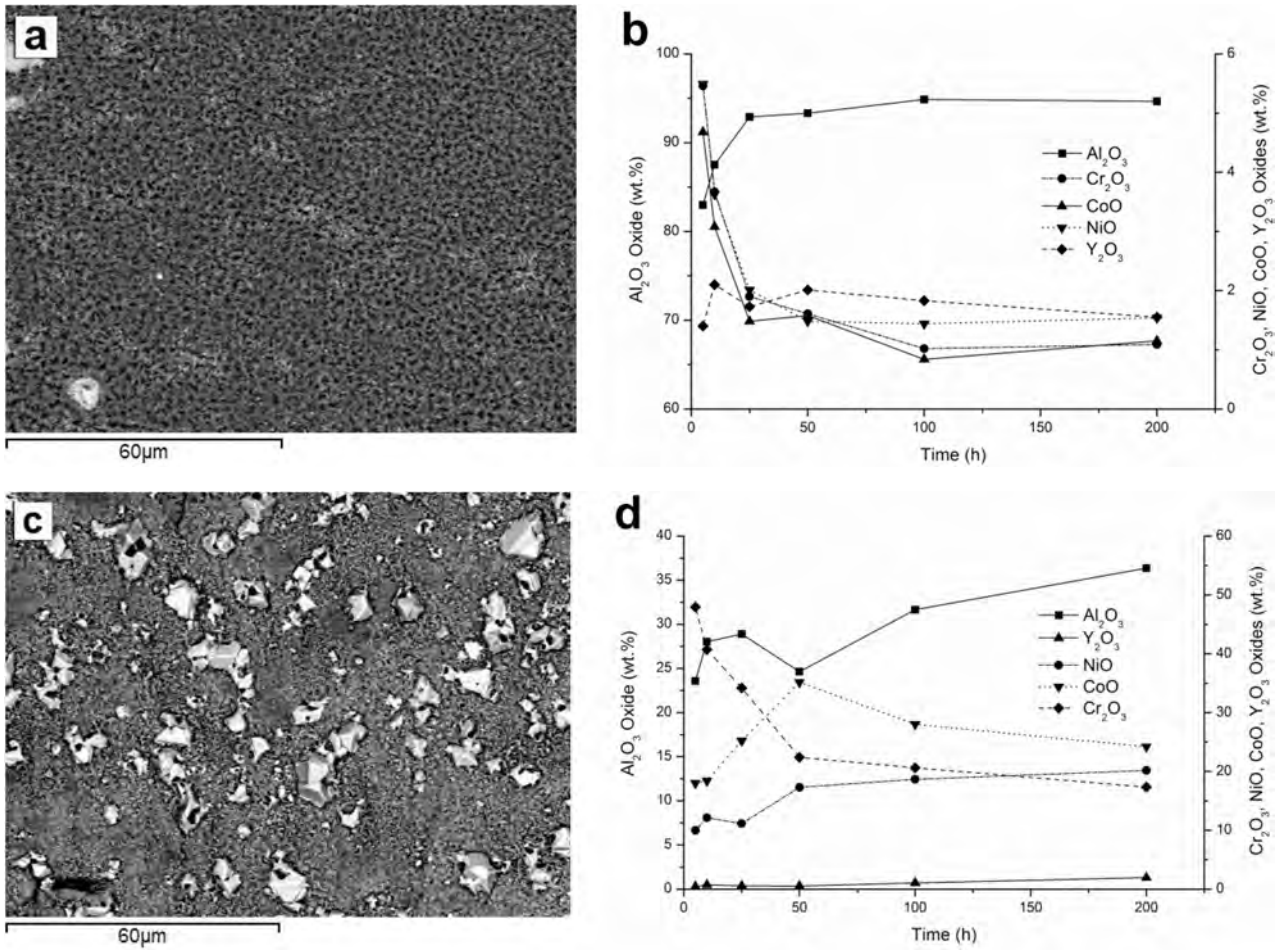


Figura 8. Morfología y posibles óxidos estequiométricos en la superficie de los recubrimientos oxidados a) micrografía (SEM BSE 20 kV) del recubrimiento NiCoCrAlY luego de 200 h a 1.100 °C b) evolución de los óxidos estequiométricos en recubrimiento NiCoCrAlY c) micrografía SEM del recubrimiento CoNiCrAlY luego de 200 h a 1.100 °C y d) evolución de los óxidos estequiométricos en recubrimiento CoNiCrAlY [15].

95% de la composición de capa de óxido. Óxidos similares fueron encontrados en la superficie del recubrimiento CoNiCrAlY.

En este caso, sin embargo, el menor contenido en Al resulta en más óxidos heterogéneos en la superficie (como se muestra en la figura 8c), los cristales de óxido de mayor tamaño en la superficie oxidada corresponden a óxidos (Co,Ni)O, confirmados mediante mediciones y mapas de composición química con EDS.

Una mayor cantidad de óxidos de Ni, Cr e Y se obtienen en el recubrimiento láser CoNiCrAlY, alcanzando cerca del 64% de la composición de la capa de óxido sobre la base de cálculo de los óxidos estequiométricos para 200 horas de oxidación a 1.100 °C (Fig. 8d).

El estudio de la superficie oxidada ha permitido tener una buena aproximación de la cinética de oxidación y la evolución de los posibles óxidos formados en los recubrimientos láser MCrAlY, sin embargo, se requiere un análisis más riguroso de lo que ocurre a lo interno de la capa de óxido formada térmicamente, por lo que se ha ampliado el estudio de la sección transversal de la cascarilla lo que ha permitido identificar los óxidos presentes, así como las inclusiones presentes en las capas de óxido que han crecido por efecto térmico (TGO).

Estos resultados y análisis han sido reportados por los autores [15]. Se ha logrado medir el espesor total

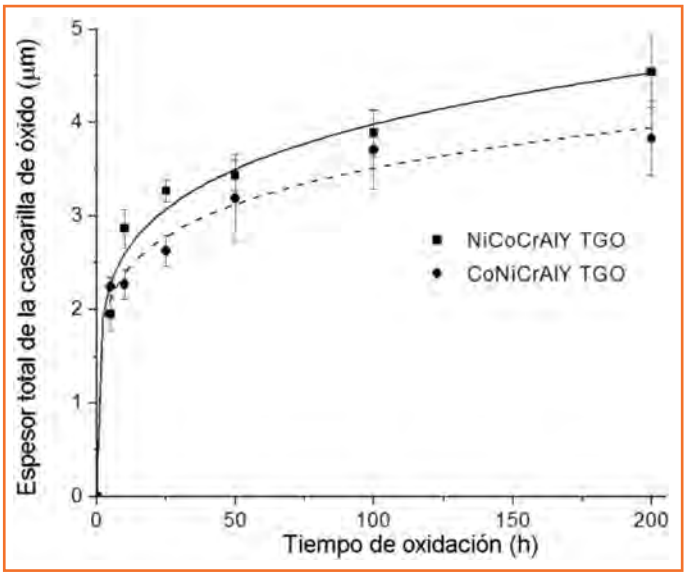


Figura 9. Evolución del espesor total de la cascarilla de óxido (TGO) con el tiempo de oxidación [15].

de las capas de óxido (Fig. 9). La capa total de cascarilla TGO del recubrimiento láser NiCoCrAlY tiene un espesor ligeramente superior al obtenido en el recubrimiento láser CoNiCrAlY (Fig. 9), además de ser completamente densa y compacta.

Por lo tanto, una barrera térmica superior se puede obtener usando este proceso de plaqueado láser coaxial sobre un sustrato de acero inoxidable austenítico.

De acuerdo a la relación entre ganancia de peso y espesor total de la cascarilla de óxido, puede deducirse que en el recubrimiento la capa de óxido porosa no protectora en la parte superior de la cascarilla TGO en el recubrimiento CoNiCrAlY esta cascarilla tiene poros (no es completamente densa), lo cual puede ser una desventaja para aplicaciones en sistemas de barrera térmica. Esto indica también que el contenido de aluminio en la aleación CoNiCrAlY ha influido directamente en el menor espesor de la capa de alúmina formada.

La medida del espesor de la cascarilla de óxido en los recubrimientos láser coaxial obtenidos en este trabajo puede ser similar, o más delgada, que la encontrada en recubrimientos MCrAlY obtenidos por otras técnicas [9,18-20], debido a que en los procesos de proyección térmica de alta velocidad, se obtiene en los límites de grano entre las partículas parcialmente fundidas mayor cantidad de óxido (mayor contenido de oxígeno), que mejoran el crecimiento de la alúmina por la difusión del oxígeno hacia el interior del recubrimiento en la etapa de oxidación [9] y la posible influencia del espesor del recubrimiento o muestra en la prueba de oxidación a alta temperatura [21], aunque esto no se traduce en la mayoría de los casos en una TGO densa, ya que suelen encontrarse poros que pueden comprometer el sistema a alta temperatura.

4. Conclusiones

Se ha seleccionado una combinación de parámetros de procesado láser que aportan una energía específica de 36.67 J/mm^2, con la cual se logra la completa fusión de las superaleaciones MCrAlY sobre láminas de acero inoxidable austenítico AISI 304 con una alta eficiencia, logrando en los recubrimientos obtenidos una adecuada geometría, mínima dilución, bajo nivel de porosidad y buena unión metalúrgica con el sustrato.

A medida que disminuye el contenido de Al, Co y Ta, y se incrementa el Fe y Mn desde el borde de la intercara del cordón, disminuye la dureza, siendo este fenómeno asociado a la disminución de la formación de la fase β durante la solidificación. La dureza en la superficie del recubrimiento casi duplica la dureza del sustrato.

Los recubrimientos láser MCrAlY obtenidos presentan una microestructura dendrítica típica de procesos de solidificación rápida.

La microestructura es γ/β para los recubrimientos NiCoCrAlY y CoNiCrAlY, confirmada con DRX, con zonas ricas en Itrio encontradas en los límites γ/γ y γ/β, y distribuidas dentro de los recubrimientos.

La fase β rica en aluminio es más dura que la fase β, por lo que en recubrimientos MCrAlY con microestructura γ/β se obtiene una mayor dureza con mayor cantidad de fase β estabilizada.

Los recubrimientos láser MCrAlY presentan un excelente comportamiento ante la oxidación a alta temperatura, evaluada a 1.100 °C hasta 200 horas, ya que son capaces de formar una capa estable de alúmina que actúa como barrera, restringiendo la difusión del oxígeno al interior del recubrimiento y hacia el sustrato.

El plaqueado láser coaxial es una buena alternativa a los procesos de proyección térmica, ya que genera una distribución uniforme de las partículas o zonas ricas en itrio en la microestructura que favorecen el crecimiento de una capa estable, adherente, gruesa y compacta de alúmina con el tiempo de oxidación.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España la financiación recibida a través del proyecto de investigación MAT2011-28492-C03. El profesor Juan Carlos Pereira Falcón agradece la beca CD-3997-2011 concedida por la Universidad de Carabobo en Venezuela para realizar sus estudios doctorales.

Este trabajo se ha desarrollado de manera conjunta entre el Instituto de Tecnología de Materiales de la Universidad Politécnica de Valencia y el Centro de Investigaciones Tecnológicas de la Universidade da Coruña campus Ferrol en España.

Referencias

[1] M.J. Pomeroy, Materials and Design 26 (2005) 223-231.

[2] W.M. Steen, Laser Material Processing (3rd ed.), Springer-Verlag, London-Berlin Heidelberg (2003).

[3] U. de Oliveira, V. Ocelik, J.Th.M. De Hosson, Surface and Coatings Technology 197 (2005) 127-136.

[4] G. Marginean, y D. Utu, Applied Surface Science 258 (2012) 8307-8311.

[5] F. Stott, Tribology International 35 (2002) 489-495.

[6] P. Wright, A. Evans, Current Opinion in Solid State and Materials Science 4 (1999) 255-265.

[7] T. Nidjam, C. Kwaernaak, W. Sloof, Metallurgical and Materials Transactions A 37(3) (2006) 683-693.

[8] T. Nidjam, L. Jeurgens, W. Sloof, Acta Materialia 53 (2005) 1643-1653.

[9] T. Nijdam, W. Sloof, Oxid Met. 69 (2008) 1-12.

[10] C. Zhu, A. Javed, P. Li, Y. Liang, P. Xiao, Surf. Interface Anal. 45 (2013) 1680-1689.

[11] J. Pereira, J. Candel, J. Amado, V. Amigó, Rev. LatinAm. Metal. Mat. 34(2) (2014) 209-217.

[12] M. Tobar, J. Amado, A. Yáñez, J. Pereira, V. Amigó, Physics Procedia 56 (2014) 276-283.

[13] J. Pereira, J. Zambrano, C. Afonso, V. Amigó, Materials Characterization 101 (2015) 159-165.

[14] H. Wang, D. Zuo, J. Yan, M. Huang, X. Li, Oxid Met. 74 (2010) 49-60.

[15] J. Pereira, J. Zambrano, M. Tobar, A. Yañez, V. Amigó, Surface & Coatings Tech. 270 (2015) 243-248.

[18] M. Di Ferdinando, et al. Surface & Coatings Tech. 204 (2010) 2499-2503.

[19] P. Richer, M. Yandouzi, L. Beauvais, B. Jodoin, Surface & Coatings Tech. 204 (2010) 3962-3974.

[20] P. Song, et al, Materials and Corrosion 62 (2011) 699-705.

[21] J. Toscano, et al, Surface & Coatings Tech. 201 (2006) 3906-3910.

metalmadrid '17

Décimo Aniversario

Junto a ROBOMATICA COMPOSITE SPAIN

Últimos Stands

NO TE QUEDES SIN ESPACIO

15 y 16 de noviembre de 2017 • Pabellones 2 y 4 • Feria de Madrid

Si tu empresa está interesada en exponer en esta edición
escríbenos a comercial@metalmadrid.com
llámanos al +34 91 231 70 04

www.metalmadrid.com
www.compositespain.com · www.robomatica.es

SU MEJOR COMUNICACIÓN

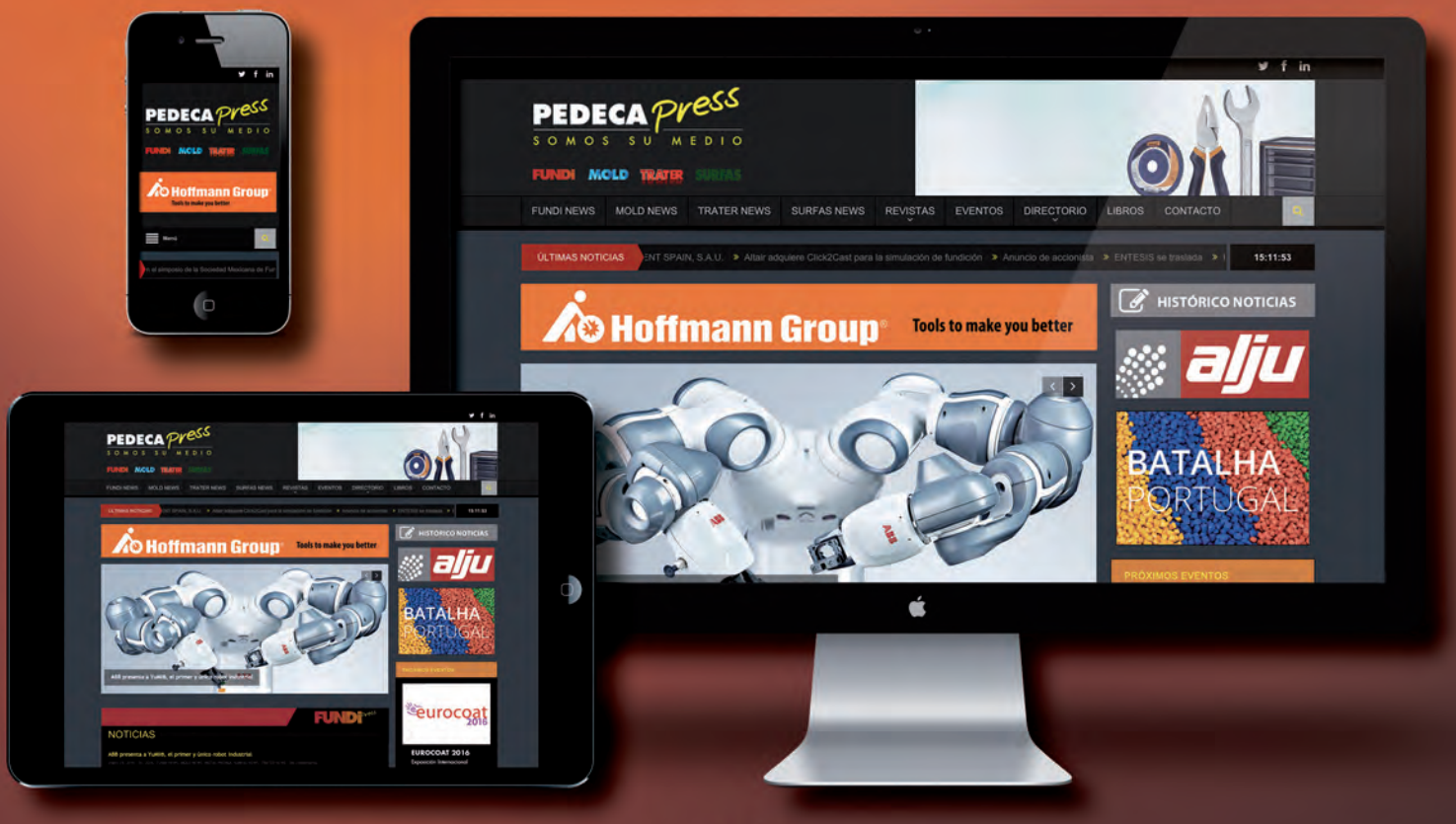
REVISTAS PROFESIONALES DEL SECTOR INDUSTRIAL

Estrenamos Nueva Web

www.pedeca.es

PREGUNTE POR NUESTROS PACKS DE PUBLICIDAD IMPRESIÓN + DIGITAL

- Nuevo diseño y navegación más fácil, rápida e intuitiva
- Nuevos contenidos con los temas que le interesan
- Nueva presentación e información actualizada día a día
- Web responsive para que consulte desde su dispositivo favorito



PEDECA Press Publicaciones

SOMOS SU MEDIO

Goya, 20. 1°. • 28001 MADRID • Telf.: 91 781 77 76 • Fax: 91 781 71 26 • pedeca@pedeca.es • www.pedeca.es

La inducción en el sector de la forja: en vías de una segunda juventud

Por Eugenio Pardo Olea, Luis Gorjón y Manuel Castro.
Ondarlan Inductotherm Group Iberia

RESUMEN

Tras repasar los principios básicos de la inducción electromagnética y su aplicación al calentamiento de tacos para posteriormente ser forjados, en este artículo se analizarán la situación actual del sector de la forja en España y las nuevas oportunidades surgidas dentro del campo de la inducción, todo ello en el contexto innovador de la Industria 4.0.

INTRODUCCIÓN

La Inducción electromagnética es un fenómeno experimentado muy comúnmente en los procesos industriales. Las condiciones para su aparición son dos: la circulación de corrientes eléctricas alternas y la existencia de materiales conductores (generalmente metales) en su proximidad. Fue Michael Faraday, en el siglo XIX, quien primero observó los fenómenos inductivos, expresándolos matemáticamente bajo la famosa ley que lleva su nombre.

$$\varepsilon = -N\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

En definitiva, la ley de Faraday se reinterpreta así: toda corriente eléctrica alterna genera un campo electromagnético variable con el tiempo. Dicho campo, a su vez, "induce" en cualquier conductor sumergido bajo su influjo, otra corriente eléctrica de sentido contrario, cuya fuerza electromotriz es proporcional a la variación del flujo en el tiempo del campo electromagnético mencionado.

Inicialmente, en muchos procesos industriales la inducción observada se consideraba perniciosa y se trabajaba en aras de su minimización. Así ocurre con los casos paradigmáticos de los motores eléctricos y en los transformadores. Las corrientes de inducción, también llamadas corrientes de Foucault en la literatura francesa o corrientes de Eddy en la literatura inglesa, son generalmente perjudiciales porque disminuyen la eficiencia de las máquinas, de los motores eléctricos y de los transformadores en los dos casos considerados anteriormente. Las pérdidas se manifiestan en forma de un calentamiento indeseado de los equipos. En estos casos la inducción es un fenómeno al que hay que combatir. Para ello, las corrientes de inducción se obstaculizan e interrumpen por diferentes trucos y métodos.

Cabe decir también que el calor producido por las corrientes de inducción es siempre debido al efecto Joule y se puede cuantificar según la fórmula siguiente:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t$$

donde Q es calor generado, I es la intensidad de las corrientes de inducción, R es la resistencia eléctrica del conductor y t es el tiempo. Este calor, que en principio es perjudicial, podría ser beneficioso en aquellas aplicaciones industriales cuyo objetivo fuera el calentamiento o la fusión de metales. Los ingenieros que se dieron cuenta de ello, decidieron darle la vuelta al fenómeno y aprovecharlo. Para ello, diseñaron conductores enroscados sobre sí mismos, hoy llamados bobinas. Así formaron solenoides, con objeto de multiplicar el campo magnético en su interior (ver figura 1) y potenciar la for-

mación de corrientes de inducción. De este modo nacieron los denominados hornos de inducción.

LA INDUCCIÓN EN LA APLICACIÓN DE FORJA

La forja (en caliente y en semicaliente) es un proceso óptimo para la utilización de hornos de calentamiento por inducción. Los tacos susceptibles de ser calentados y las bobinas de calentamiento tienen ambos simetría de revolución (ver figura 1). El generador proporciona corrientes alternas (amarillas en la figura) que generan un flujo del campo electromagnético (en negro) multiplicado por el número de espiras y, por consiguiente, muy intenso en el interior de la bobina. Los tacos circulan por el túnel que constituye una o varias bobinas dispuestas en fila india, sumergidos en un intenso campo electromagnético variable. Las corrientes de inducción se observan en la figura pintadas en color rojo. Dichas corrientes circulan alrededor del taco según se ve en la figura 1. En el corte transversal de un taco (figura 2), las corrientes de inducción forman una corona circular. El espesor de esta corona (penetración) depende de la frecuencia del generador, que es la misma que la de las corrientes de inducción: a mayor frecuencia, menor penetración (figura 3), cuantificándose la penetración según la fórmula siguiente:

$$\delta \approx \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

en la que δ es la penetración de las corrientes, "f" es la frecuencia de las mismas, μ es la permeabilidad magnética del material y σ es la conductividad eléctrica del mismo material.

En resumen, los tacos de forja se calientan superficialmente por inducción, según la figura 2, con una penetración que depende de la frecuencia. El resto del calentamiento, el producido hacia el interior, se realiza por conducción. El túnel de bobinas del horno se calcula lo suficientemente largo para que se homogeneice la temperatura del taco durante su recorrido a través del mismo.

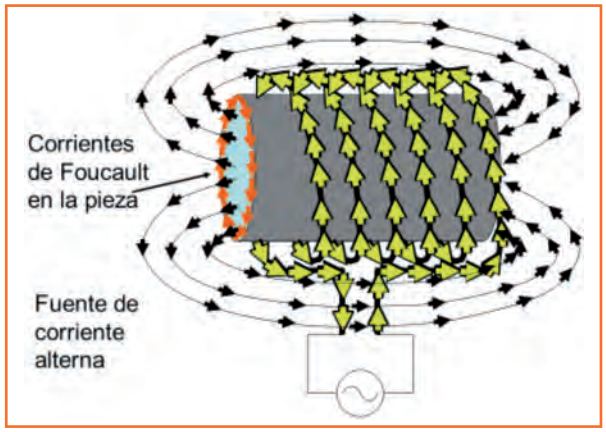


FIGURA 1: Esquema de bobina de inducción, taco de forja, corrientes de inducción y campo electromagnético.

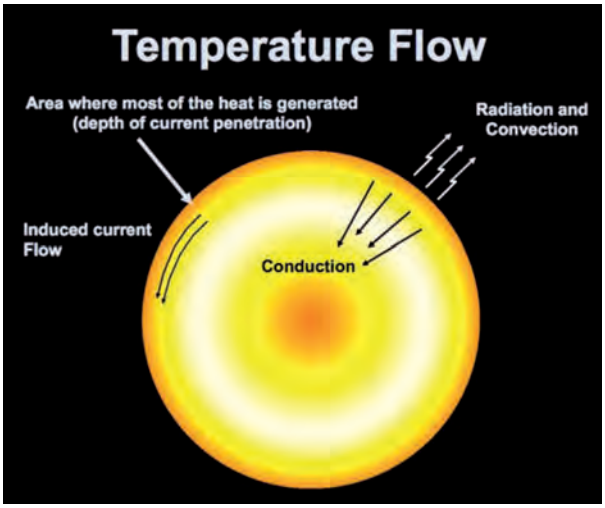


FIGURA 2: Coste transversal de taco y transferencias de calor en el mismo.

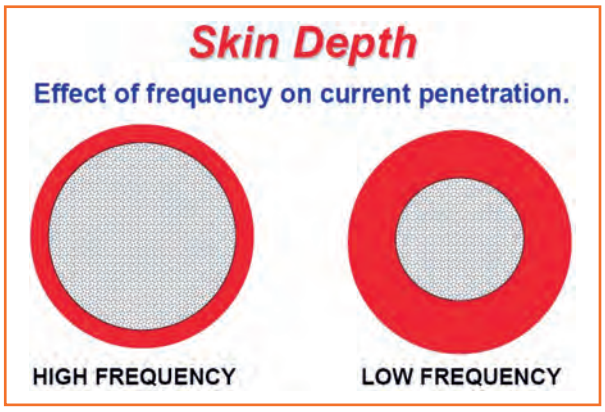


FIGURA 3: Comparación de coronas circulares de penetración a alta y a baja frecuencia.

En los años setenta del siglo veinte, los beneficios de la inducción en el sector de la forja por estampación fueron tan evidentes, que los hornos de calentamiento por inducción inundaron el mercado, estando presentes prácticamente en todos los talleres de forja. La robustez de estos equipos ha permitido que muchos de ellos se mantengan operativos incluso a día de hoy, lo cual supone que el parque de equipos de inducción en el sector se halle muy envejecido. Los departamentos de mantenimiento tienen muchas dificultades para conseguir re-

puestos de equipos obsoletos. Además, la eficiencia energética en los equipos antiguos es muy baja con respecto a la de los actuales. La inducción es, hoy en día, una tecnología muy implantada y tradicional. Sin embargo, la aparición de nuevos hornos que disponen de tecnologías modernas permite mejorar notablemente la homogeneidad de los tacos y sobre todo flexibilizar las cadencias de producción, pudiéndose ajustar las potencias de los diferentes módulos de un horno, según las necesidades del proceso y del producto. La velocidad de avance de los tacos (cadencia), la delta T admisible (homogeneidad en el calentamiento), los diferentes materiales utilizados (composición del acero...) etc... son características de proceso que pueden variar de un día para otro en un mismo horno, según sea la pieza final. Hoy la forja requiere flexibilidad en la producción para competir con éxito.

A este respecto, los hornos antiguos no son flexibles en absoluto, ya que fueron diseñados para un proceso concreto y para una cadencia fija. Dichos hornos utilizaban la misma potencia en cada bobina, con diferentes diseños de las mismas según fuera su posición en el túnel y su función (calentar u homogeneizar). Por el contrario, los nuevos hornos permiten ajustar la potencia para cada bobina independientemente, merced a su diseño modular y a un software de simulación para el reparto de potencias. De este modo, el mismo horno puede adaptarse a diferentes características de proceso, manteniendo la calidad de calentamiento en el taco y el mínimo consumo energético. Además, al ser todas las bobinas iguales, se reduce el stock de bobinas de repuesto.

NUEVAS TECNOLOGÍAS DE INDUCCIÓN EN FORJA: LA INDUSTRIA 4.0

La irrupción de los elementos electrónicos de estado sólido en la electrónica de potencia, los avances informáticos en la simulación computerizada y las nuevas tecnologías en gestión de datos, han propiciado la aparición de hornos modernos de inducción para la aplicación de forja, todo ello en el ámbito de la denominada cuarta revolución industrial.

Estos nuevos hornos modulares alcanzan eficiencias eléctricas del 95%, son flexibles para adaptarse a cambios rápidos en la producción, son más fiables que sus antecesores, permiten el diagnóstico y gestión de errores a distancia y sus datos de producción pueden acu-

Año	TOTAL (t)	SIFE (t)	% Producción SIFE	Empleo Forja	% Ventas Exportación
2008	248.580	224.479	90,3 %	2.403	64,3 %
2009	161.827	127.483	78,8 %	1.881	65,6 %
2010	227.035	178.654	78,7 %	2.056	80,1 %
2011	280.561	256.209	91,3 %	2.251	77,9 %
2012	268.161	245.214	91,4 %	2.201	82,5 %
2013	279.016	253.545	90,9 %	1.878	83,2 %
2014	273.149	249.261	91,3 %	2.074	87,6 %
2015	305.026	291.499	95,6 %	2.336	84,2 %
% 2015 / 2008	22,7 %	17,6 %			

FIGURA 4: Tabla anual de toneladas de producción y cifras de empleo en forja. Cortesía de SIFE.

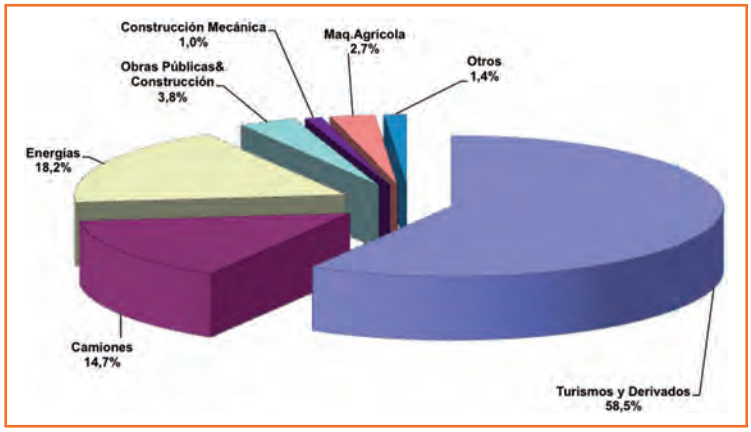


FIGURA 5: Distribución del mercado de forja por segmentos en 2015. Cortesía de SIFE.

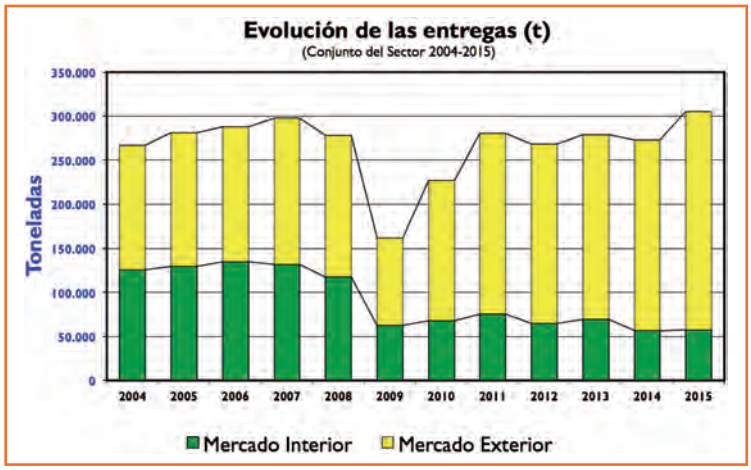


FIGURA 6: Evolución del mercado interior y del mercado exterior en Forja. Cortesía de SIFE.

mularse y tratarse centralizadamente en fábrica, todo ello manteniendo la robustez mecánica de los hornos tradicionales. Hoy podemos decir que la revolución de la industria 4.0 ha llegado ya a la forja.

Pero de nada servirían las nuevas tecnologías si no hay demanda de productos en los que aplicarlas. En este sentido, el sector de la forja tiene una demanda pujante, como se puede ver en las figuras 4, 5 y 6. Los datos corresponden a las producciones de España en Toneladas y han sido suministrados amablemente por SIFE (Sociedad de Industrias de Forja por Estampación). En las figuras 4 y 6 se muestra cómo la crisis se ha superado en gran medida debido al enfoque de nuestras forjas hacia el mercado exterior. Por otro lado, la figura 5 nos muestra los segmentos en los que se utilizan las piezas forjadas, con un predominio claro de un 58,5% en el sector de automoción. Ambos entornos de éxito, la exportación y el mercado de la automoción, son entornos muy competitivos y cambiantes en los que la maquinaria productiva, debe permitir fabricar con flexibilidad los productos de mayor calidad al coste más reducido posible. La innovación en el campo de los hornos de inducción es, sin ninguna duda, un valor añadido fundamental.

Por ello, empresas multinacionales como el GRUPO INDUCTOTHERM, han identificado la forja como un sector estratégico para crecer. Concretamente España es una excelente plataforma de lanzamiento para las nuevas tecnologías en inducción, ya que el parque de hornos existentes de forja está muy envejecido y requiere renovación. Sin embargo, las sustituciones no deben tener un carácter aleatorio. Son necesarios criterios de sustitución. Estos criterios pueden ser muy variados. Uno de ellos, de fácil cuantificación, es el criterio de la eficiencia energética. En el caso de disponer de varios hornos candidatos a ser reemplazados por un horno moderno, el consumo energético puede ser el mejor de los criterios de selección, puesto que la forja y en concreto la inducción son procesos muy intensivos en energía. Las diferencias de eficiencias entre un horno moderno y un horno obsoleto son crecientes a medida que aumenta la obsolescencia del segundo. Esta diferencia puede llegar a ser de hasta un 50% de eficiencia, calculada mediante un algoritmo según sean los "cosenos de φ" del horno moderno y del horno obsoleto. La medición se realiza con un analizador de redes (ver figura 7). Analizando, el triángulo de potencia de la figura 8 se calcula la eficiencia de cada horno y como consecuencia los kW/Ton de producción y de ahorro.

En el plan de acción realizado por el grupo INDUCTOTHERM y bautizado con el nombre INDUCTOTEST, la filial del GRUPO en España, ONDARLAN, ha medido multitud de cosenos de φ en equipos obsoletos activos en diferentes plantas de España, muchos de ellos por debajo de valores de 0,45. Esto implica eficiencias extraordinariamente bajas. Dependiendo de las producciones consideradas, trabajando a dos turnos, se puede calcular que el período de amortización de un horno nuevo de inducción puede ser de tan sólo un año, únicamente gracias al ahorro de energía involucrado en la producción con el horno nuevo respecto a la del antiguo. Clasificando los hornos de una planta por orden creciente de eficiencia obtendremos un criterio económico de renovación. Etiquetados los hornos según sus eficiencias, el menos eficiente se reemplazará primero. No obstante, éste no es el único criterio posible: el índice de averías, posibles cuellos de botella, requisitos de calidad o carga presente y futura de trabajo, son otros criterios principales o complementarios. Nadie mejor que el for-

FIGURA 7: Analizador de redes para medida de coseno de ϕ.

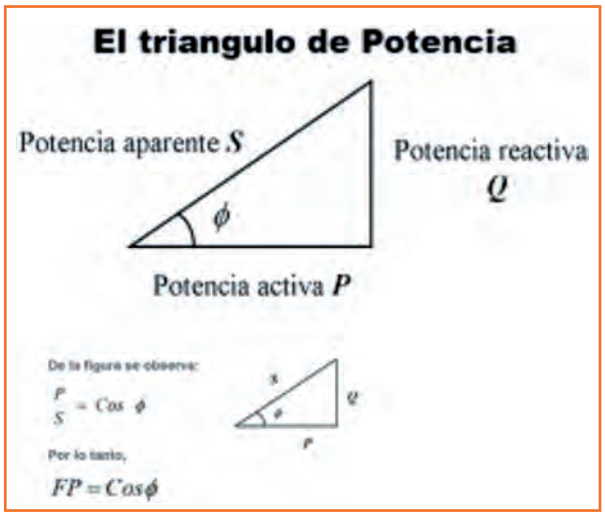


FIGURA 8: Triángulo de potencia.

jador para ponderar cada uno de ellos de cara a una decisión de sustitución.

Consecuentemente, además de la eficiencia, la producción con el horno nuevo permitirá el calentamiento de los tacos con mayor homogeneidad y sobre todo con mayor flexibilidad en la producción. Otra externalidad favorable es el aumento en la fiabilidad del horno nuevo. Además, también las necesidades de refrigeración son menores, debido a que la ineficiencia energética en la inducción se "paga" en forma de un mayor y perjudicial calentamiento de los equipos. Todo ello porque la energía se conserva y las pérdidas calientan innecesariamente los propios armarios eléctricos de los hornos y las bobinas correspondientes, cuyas necesidades de refrigeración aumentan y la fiabilidad de la electrónica disminuye. En casos de ineficiencia máxima, los hornos de inducción llegan a funcionar como si se tratasen de "calderas" al producir grandes cantidades de agua caliente (el agua de refrigeración), en lugar de transferir directamente la energía de la red al calentamiento exclusivo de los tacos de forja. ¡Un verdadero desastre!

En definitiva, todas las consideraciones anteriores apuntan hacia un objetivo común: rejuvenecer el parque de hornos. Sin embargo, la rentabilidad del mismo no sólo es cuantificable en términos económicos directos de amortización, sino también en términos de calidad final del producto y de flexibilidad en la producción a la hora de adaptarse a diferentes series de piezas forjadas.

La experiencia en España de un fabricante como el GRUPO INDUCTOTHERM no puede ser más satisfactoria, tanto en la sustitución de hornos viejos por hornos modernos en el territorio nacional como en la firma de acuerdos internacionales, de cara a facilitar el crecimiento de las empresas españolas de forja en el extranjero. En España no sólo se exportan piezas forjadas, sino que desde España también se están implantando plantas productivas en el extranjero. No debemos olvidar que, por ejemplo, CIE AUTOMOTIVE es el tercer fabricante del mundo en toneladas de producción de piezas forjadas, únicamente por detrás de Bharat Forge (India) e Hirschvogel Automotive Group (Alemania). No obstante, pese a su gran crecimiento, CIE AUTOMOTIVE mantiene su centro de decisión en el País Vasco, mientras sus plantas productivas de forja se extienden por Alemania, Reino Unido, Lituania, Brasil, Méjico, India y China. Por ello, su dirección no sólo busca mejorar las tecnologías de producción, sino firmar acuerdos internacionales con proveedores de carácter dual GLOBAL/LOCAL que permitan estandarizar soluciones válidas en todo el mundo, manteniendo la presencia y asistencia locales.

FIGURA 9A: Horno modular de inducción INDUCTOFORGE con cambio automático de bobinas.

FIGURA 9B: Horno modular de inducción INDUCTOFORGE

Las figuras 9 A y 9 B nos muestran dos hornos modulares INDUCTOFORGE de última tecnología. En este caso, cada bobina es alimentada por un módulo de potencia independiente. Esto permite equilibrar, adaptar y optimizar los inputs de energía de los módulos a las diferentes propuestas de producción.

Como resultado de ello, los tacos calentados se obtienen con una máxima homogeneidad al menor consumo energético posible, para cualquier cadencia de producción. La simulación y gestión de datos de cara a definir cada receta de producción se realiza merced al software I-HAZ 2, cuya pantalla de entrada de datos se puede apreciar en la figura 9. La revolución 4.0 en forja no ha hecho más que empezar.

A este respecto, por ejemplo, en 2017 se ha firmado un acuerdo entre CIE AUTOMOTIVE e INDUCTOTHERM para la estandarización de un concepto de celda completa en forja de cigüeñales, cuya implantación se hará primero en LITUANIA, posteriormente en CHINA y ESPAÑA, y finalmente con alta probabilidad en MÉJICO. Podemos decir que la forja no sólo ha innovado; también se ha globalizado. Además, las soluciones globales estándar permiten el análisis centralizado de los datos y parámetros obtenidos en las diferentes plantas, que serán comparables entre sí y permitirán mejorar la productividad de cada una de ellas. Asimismo se evita la multiplicación de tareas mediante una gestión coordinada.

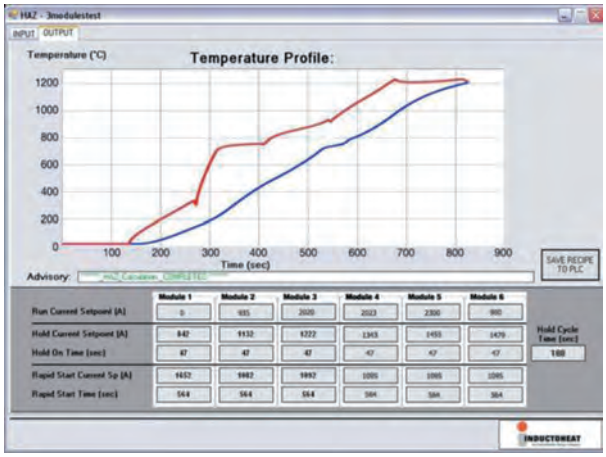


Figura 10: Programa de simulación y cálculo de recetas I-HAZ 2.

CONCLUSIÓN

La inducción es una tecnología tradicional cuya implantación en el sector de la forja se produjo hace décadas. Sin embargo, los avances tecnológicos experimentados en los últimos años han permitido renovar su carácter innovador con mejoras significativas, tales como: unas mayores eficiencias energéticas, mayor flexibilidad respecto a las cadencias de producción, mayor fiabilidad y aumento de la homogeneidad en el calentamiento de los tacos.

El envejecimiento del parque de hornos y el entorno fuertemente competitivo del mercado de forja internacional, constituyen los dos principales estímulos para afrontar la modernización de los medios de producción en las plantas de forja.

Por otra parte, la globalización en el sector no sólo exige tener en cuenta la mejor tecnología disponible, sino proveedores de equipos globales con soluciones estandarizadas y con servicios de asistencia local.

Agradecemos a SIFE (Sociedad de Industrias de Forja por Estampación) su inestimable ayuda para la redacción de este artículo.

El cobre y sus aleaciones (Parte II)

Por Manuel Antonio Martínez Baena. Ingeniero Metalúrgico

2.2.1. *Latones alfa*

Los **latones alfa** –*también denominados* ***latones de trabajo en frío***– contienen un máximo de 36 por 100 de cobre (Cu ≤ 36%) en peso. Cristalizan en el sistema cúbico centrado en el cuerpo (CC) y se caracterizan por una gran ductilidad a temperatura ambiente deformándose por laminación, embutición, repulsado, trefilado, y laminado de rosca.

Dentro de los latones alfa se distinguen dos subgrupos principales:

- ***Latones amarillos alfa*** con contenidos de cinc entre el 20 por 100 y el 36 por 100 [**Zn** = (20 ÷ 36%)].
- ***Latones rojos alfa*** con contenidos de cinc entre el 5 por 100 y el 20 por 100 [**Zn** = (5 ÷ 20%)].

2.2.1.1. *Latones amarillos alfa*

Los **latones amarillos alfa**, combinan la buena resistencia con una alta ductilidad. Por ello son aptos para trabajos donde se exigen altas deformaciones en frío. Los procesos de deformación plástica en frío producen puntos tensionales, que hacen a este grupo de latones susceptibles a la corrosión intergranular, denominada ***corrosión bajo tensión****. Corrosión que, especialmente se manifiesta cuando el material se expone en atmósferas amoniacales. La presencia de grietas intercristalinas, –**figura 2.6**– ocasionadas por corrosión bajo tensión, se debe a esas fuertes tensiones residuales, reiteramos, producidas en material –***latón amarillos alfa***– durante su deformación y conformación en frío.

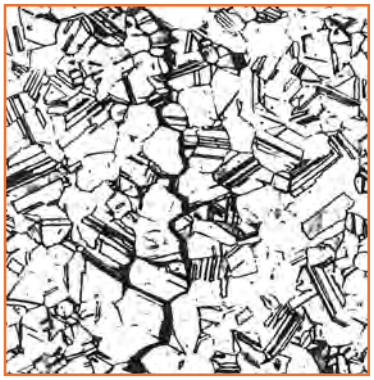


Figura 2.6. Grietas intercristalinas producidas por efecto de corrosión bajo tensión. Latón amarillo alfa **70 Cu-30 Zn**.

La liberación de los esfuerzos de tensión se produce mediante recocido a una temperatura de tratamiento que no provoque una disminución muy acusada de las características mecánicas, resistencia mecánica y dureza en el material trabajado en frío. Para ello se han de emplear temperaturas de recocido –*modernamente bajas*– entre 230 y 250 °C.

Los ***latones amarillos alfa*** están expuestos también especialmente a disoluciones selectivas del material que ocurre cuando se ataca con preferencia el aleoelemento más activo –*por la acción de un proceso corrosivo*– de la aleación en estado sólido. El ejemplo típico de esta forma de corrosión es el ***descincificado*** que sufren, en especial los ***latones amarillos alfa***, cuando entran en

* La corrosión bajo tensión es un fenómeno de ataque localizado que se presenta en la mayoría de metales y aleaciones metálicas y, particularmente, en los ***latones amarillos alfa***. Se define como una ruptura espontánea del metal bajo la acción conjunta de una solicitación mecánica de tracción, normalmente estática, y un medio corrosivo; **p.ej.**: una atmósfera de amoniaco.

Figura 2.7. Corrosión por descincificación de un latón amarillo alfa **70Cu-30 Zn**.

contacto con ácidos, aguas salobres y/o aguas impuras con alto contenido de oxígeno y dióxido de carbono, que provocan una eliminación por disolución del cinc aleado con el cobre; **figura 2.7**. La ***descincificación**** es, pues, un tipo de corrosión que afecta, preferentemente, a los latones y donde la fase rica en cinc es atacada en forma preferencial. Como consecuencia de ello, se observa una zona de color rojizo, porosa, con pequeños residuos de cobre en superficie. Superficie descincificada que se presenta, normalmente, en forma de capa –*generalizada*– localizada o tapón, que depende del medio de ataque: bien sea más o menos ácido.

Ejemplo de ***descincificación*** la observamos en las micrografías de la **figura 2.8** [**a** y **b**] perteneciente a un latón amarillo alfa [**70 Cu - 30 Zn**]. El cinc, en especial, se elimina del material –***latón***– dejando una capa de cobre y óxido de cobre relativamente porosa, esponjosa y débil, que en realidad es una disolución selectiva; que si no se procura detener, finalmente penetraría en el metal debilitándolo estructuralmente y permitiendo la filtración de líquidos o gases, a través de la capa afectada, en el resto de la masa metálica.

Los latones amarillos alfa que más se utilizan son los llamados ***latones para cartuchería***, denominados también latones para embutición [**70 Cu-30 Zn**]. Latones

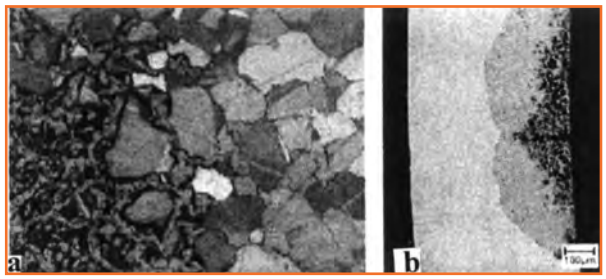


Figura 2.8. Microestructuras del material de la figura 7.7. (**a**) Probeta atacada y probeta sin atacar (**b**).

* Pequeños contenidos de arsénico (**As**) y/o de antimonio (**Sb**), en los mencionados latones, minimizan la ***descincificación***.

que tienen que estar exentos de impurezas tales como hierro (**Fe**), bismuto (**Bi**), antimonio (**Sb**), etc. La tolerancia, respecto al bismuto, es prácticamente cero; siendo su influencia mucho más negativa cuando se trabaja en caliente. El hierro influye principalmente sobre el revenido.

En la condición de recocido total, el alargamiento a tracción de los ***latones para cartuchería***, es mayor que el de cualquier otro material del rango de los latones alfa. Esto sucede cuando la carga de rotura es relativamente superior a 350 MPa (**R** > 350 MPa).

2.2.1. 2. *Latones rojos alfa*

Los **latones rojos alfa** son un grupo de aleaciones **Cu-Zn** para forja, con contenido de cinc por debajo del 29 por 100 (Zn ≤ 29%) que tienen, generalmente, mayor resistencia a la corrosión que los latones amarillos, ya que los latones rojos alfa no son susceptibles a la presencia de fisuras por corrosión bajo tensión.

Los latones rojos se pueden forjar en caliente a partir del propio lingote de partida y siempre cuando todavía su temperatura está entre 750 y 900 °C. Pero es norma, en la mayoría de los casos preceptiva, terminar el trabajo con un acabado en frío. Generalmente, casi siempre durante la etapa de acabado en frío, se les da un recocido previo a temperaturas comprendidas entre 400 y 800 °C.

Los latones rojos alfa con bajo cinc (**Zn** ≤ 20%), son los más comunes; y, entre los más importantes se encuentran: (1) ***oropel***; (2) ***bronce comercial***; (3) ***latón rojo***; y (4) ***latón bajo***.

1. El ***oropel***, –"*piel de oro*"– de composición 95 por 100 de cobre y 5 por 100 de cinc [**95Cu-5Zn**], tiene mayor resistencia que el cobre. Se emplea para acuñación de monedas, medallas, fichas, fulminantes, emblemas, y piezas en general que necesitan un alto grado de pulido. Normalmente se presenta en láminas muy batidas y adelgazadas que imitan al oro.

2. El ***bronce comercial***, de composición 90 por 100 de cobre y 10 por 100 de cinc [**90Cu-10Zn**], tiene excelentes propiedades trabajado en frío y, también, en caliente. Se emplea en joyería de fantasía, polveras, estuches de labios, piezas forjadas, remaches y tornillos. Con un porcentaje de plomo del 1,75 por 100 (**Pb** = 1,75%) se utiliza para la fabricación de tornillos, y otras piezas que se mecanizan en tornos automáticos.

3. El ***latón rojo*** [**85Cu-15Zn**], se utiliza para conductores eléctricos, tubos para condensadores, tubos intercambiadores de calor y panales para radiadores. El término ***latón rojo*** se emplea también, como más adelante veremos, a un grupo de aleaciones de moldeo con contenidos relativamente pequeños en cinc (**Zn**), y adiciones de plomo (**Pb**) y estaño (**Sn**).

En realidad, el elemento de aleación más importante es el estaño (**Sn**); ya que su efecto endurecedor es dos veces mayor que el del cinc (**Zn**). Por dicha razón, estas aleaciones se conocen, también, como bronces para válvulas. Se caracterizan por su color rojizo, por su resistencia a la corrosión, por su facilidad de trabajado y por su buen ajuste bajo presión.

4. El ***latón bajo*** [**80Cu-20Zn**], se utiliza en trabajos metálicos ornamentales, medallones, fuelles de termostato, instrumentos musicales, tubos flexibles, y otros componentes donde se necesite un estirado en frío profundo.

Resumiendo: todo el conjunto de ***latones alfa*** tienen una amplia aplicación debido a su facilidad de conformado y puesta en forma en frío. Son económicamente rentables, es decir, de una fácil economía.

Los latones alfa (α), al igual que los $\alpha + \beta$, presentan las característica singular de aumentar su resistencia y ductilidad al mismo tiempo, a medida que el contenido de cinc se incrementa hasta llegar al 35 por 100 (**Zn** ~ 35%) en peso; **figura 2.9**.

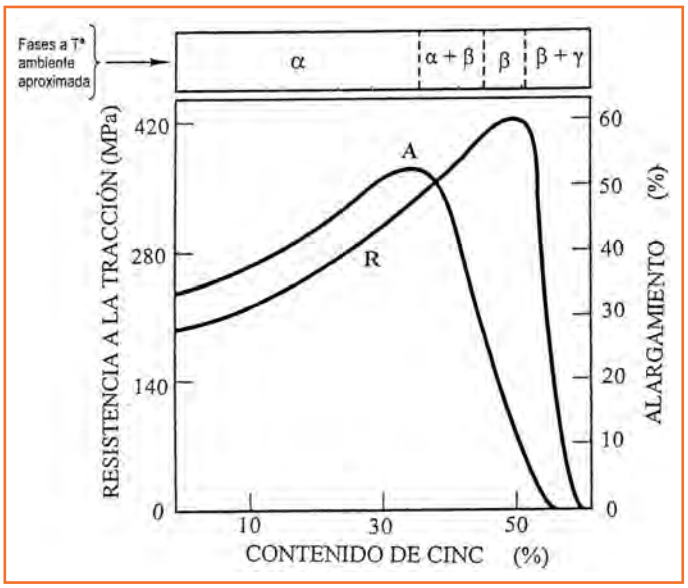


Figura 2.9. Características de las aleaciones cobre-cinc [**Cu-Zn**].

2.2.2. *Latones alfa + beta*

Los **latones alfa + beta** contienen una proporción de cinc comprendida entre 38 por 100 y 42 por 100 [**Zn** = (38 ÷ 42%)] en peso. A diferencia de los latones alfa, la capacidad de deformación y de conformación a temperatura ambiente es limitada. La presencia de la fase beta (α) en la masa matricial de la aleación [$\alpha + \beta$], dificulta el trabajado en frío. Por el contrario se trabajan fácilmente a elevadas temperaturas en los distintos procesos de conformado: extrusión, forja y estampación en matriz cerrada. El rango de temperatura para el trabajo en caliente está comprendido entre 650 ºC y 750 ºC [Tª = (650 ÷ 750 ºC)].

Dentro de los ***latones alfa + beta*** [$\alpha + \beta$], a parte del ***Metal Muntz*** [**60Cu-40 Zn**], antes mencionado, y considerado el más importante de esta relevante familia, podemos distinguir los siguientes subgrupos: (1) *latón de alta maquinabilidad*; (2) *latón forjable*; (3) *bronce para arquitectura*; (4) *latón naval*; (5) *bronce al manganeso*; y (6) el ya mencionado *Metal Muntz*.

2.2.2.1. *Latón de alta maquinabilidad*

El plomo (**Pb**), al igual que en los aceros es elemento que facilita la maquinabilidad, en las aleaciones de cobre ocurre lo mismo. El latón de alta maquinabilidad [**61Cu-35Zn-3Pb**], como su *propio* nombre indica, tiene la mayor maquinabilidad sobre el resto de latones. Característica que se combina con buenas propiedades mecánicas y de alta resistencia a la corrosión.

El laton de alta maquinabilidad se utiliza en la fabricación de engranajes y de piezas de alta producción en tornos automáticos: casquillos, bulones, tornillos, etc.

2.2.2.2. *Latón forjable*

El latón forjable [**60Cu-38Zn-3Pb**] tiene excelentes condiciones de forjado y una alta maquinabilidad. Entre las aplicaciones típicas está la fabricación de pasamanos para decoración, verjas, bisagras y armazones para cerraduras, así como todo tipo de piezas estampadas en caliente de uso industrial.

2.2.2.3. *Latón naval*

El latón naval [**60Cu-39Zn-0,75Sn**), también conocido como ***bronce tobin***, incrementa la resistencia a la corrosión en agua salada y se emplea en la fabricación de

placas de condensador, varillas para soldeo, bielas y vástagos para válvulas. El latón naval con una adición de plomo del 1,75 por 100 (**Pb** = 1,75%) mejora altamente su maquinabilidad; se utiliza en piezas y elementos para la industria naval.

2.2.2.4. *Bronce al manganeso*

El bronce al manganeso [**58Cu-39Zn-1,4Fe-1Sn-0,1Mn**] es, realmente, un latón especial con alto contenido de cinc (**Zn**) que combina una elevada resistencia mecánica con una importante resistencia al desgaste. El manganeso (**Mn**) mejora sustancialmente la resistencia, límite elástico y el alargamiento de las aleaciones cobre-cinc, así como su resistencia a la corrosión en agua de mar. El manganeso mejora la fluidez del material líquido en colada. El bronce al manganeso se utiliza para la fabricación de discos de embrague, elementos extruidos, piezas estampadas, varillas para soldar, vástagos para válvulas, etc.

2.2.2.5. *Metal Muntz*

Esta aleación [**60Cu-40Zn**], ya antes mencionada, de composición aproximada 60 por 100 de cobre (**Cu** ~ 60%) y 40 por 100 de cinc (**Zn** ~ 40%), tiene la mejor combinación de propiedades dentro de las ***aleaciones alfa + beta***, –ver **figura 2.2**– y es uno material más importantes entre todos los latones de alta resistencia a la rotura. Dichas aleaciones, que presentan un color amarillo rojizo, se caracteriza principalmente por su gran resistencia a la tracción y, también, por su buena aptitud a la conformación en caliente. El ***metal Muntz***, por los argumentos antes apuntados, se utiliza para el hechurado, tanto de piezas moldeadas, como el de piezas forjadas en caliente.

El ***metal Muntz***, moldeado en arena, presenta unas propiedades mecánicas parecidas a las del acero al carbono dulce (**C** ≤ 0,10%); alcanzando una resistencia a la tracción comprendida entre 350 y 400 MPa [**R** = (350 ÷ 400 MPa)] y un alargamiento entre el 20 por 100 y 30 por 100 [**A** = (20 ÷ 30%)]. El metal Muntz moldeado, como ya se ha comentado, se trabaja con relativa facilidad a temperaturas comprendidas entre los 650 y 750 °C. Pero se trabaja mucho mejor en frío, ya que la presencia de la fase beta (β) en su masa matricial, dificulta en gran manera el trabajo en caliente. Las aleaciones [**60Cu-40Zn**] forjadas son más dúctiles.

En la práctica, los ***latones alfa + beta*** se mecanizan con herramientas de corte en general, mejor que los latones alfa (α), aunque no contengan plomo (**Pb**) alguno en su composición. Resultado que se justifica por la ayuda que presta el constituyente estructural beta (β); debido a su más alta dureza y, también, por su mayor aptitud para la formación y rotura de la viruta.

2.2.3. *Latones fundidos*

Hasta ahora se han estudiado, principalmente, los latones alfa + beta forjados como aleaciones binarias de cobre (**Cu**) y cinc (**Zn**). Los ***latones fundidos*** son semejantes en su denominación a los forjados; pero, generalmente, contienen cantidades apreciables de otros elementos de aleación. El estaño puede estar presente en proporciones comprendidas entre 1 por 100 y 6 por 100 [**Sn** = (1 ÷ 6%)], y el plomo en cantidades entre el 1 por 100 y 10 por 100 [**Pb** = (1 ÷ 10%)]. Estas aleaciones pueden contener, además: hierro (**Fe**), manganeso (**Mn**), níquel (**Ni**) y aluminio (**Al**).

Un ejemplo de latón fundido es el ***latón rojo al plomo*** [**85Cu-5Sn-5Pb-5Zn**], que se utiliza en el moldeo de piezas en general que requieren propiedades de una mediana resistencia mecánica, ausencia casi total de defectos y una buena maquinabilidad. Material que es apropiado para la fabricación de válvulas de baja presión, accesorios para tuberías, pequeños engranajes, y piezas fundidas para bombas.

2.3. BRONCES

El término **bronce** se aplicó originariamente a las aleaciones base de ***cobre-estaño*** [**Cu-Sn**] con contenidos aproximados del 12 por 100 del elemento principal aleante –***estaño*** (**Sn** ≤ 12%)–. Sin embargo, en la actualidad este término se emplea para designar cualquier aleación de cobre, a excepción de aquéllas que contengan cinc (**Zn**) en su composición, aunque en algunas de dichas aleaciones, ocasionalmente se encuentra dicho elemento. Por su nombre, el bronce lleva implícita la idea de una aleación de mayor clase que el latón; y, como hemos descrito en los anteriores apartados, se ha aplicado este término de modo incorrecto a algunas aleaciones que son realmente ***latones especiales***.

Los bronces son más resistentes y duros que cualquiera otra aleación común, excepto el acero; al que le supera en resistencia a la corrosión y facilidad de lubricación. Los bronces actuales tienen una importante aplicación

ALEACIÓN Designación EN Simbólica	Composición (%)	ESTADO O/H	Características Mecánicas R MPa	LE MPa	A (%)	HB 10D²
I. BRONCES PARA FORJA						
Cu-Sn2	Sn = (1,00 ÷ 2,50) P = (0,02 ÷ 0,30) Cu = Resto	O	280	110	45	
		H18	530	500	3	
Cu-Sn4	Sn = (3,00 ÷ 4,50) P = (0,02 ÷ 0,40) Cu = Resto	O	330	130	50	
		H18	660	580	2	
Cu-Sn5	Sn = (4,50 ÷ 5,50) P = (0,02 ÷ 0,40) Cu = Resto	O	350	130	55	
		H18	720	620	2	
Cu-Sn6	Sn = (5,50 ÷ 7,50) P = (0,02 ÷ 0,40) Cu = Resto	O	370	150	60	
		H18	800	760	2	
Cu-Sn8	Sn = (7,50 ÷ 9,00) P = (0,02 ÷ 0,40) Cu = Resto	O	420	170	65	
		H18	800	770	2	
Cu-Sn10	Sn = (9,00 ÷ 11,00) P = (0,02 ÷ 0,40) Cu = Resto	O	440	190	65	
		H18	830	800	3	
II. BRONCES PARA MOLDEO						
Cu-Sn10	Sn = (9,00 ÷ 11,00) P = (0,02 ÷ 0,40) Cu = Resto	Arena	200	80	10	—
RG5 "Latón rojo"	Sn = (4,0 ÷ 6,0) P ≤ 0,05 Zn = (4,0 ÷ 6,0) Pb = (4,0 ÷ 6,0) Cu = Resto	Centrifu.*.	300	120	25	75
		C.C.**	300	120	25	75
RG7 "Latón rojo"	Sn = (6,0 ÷ 8.0) P ≤ 0.05 Zn = (3,0 ÷ 5,0) Pb = (5,0 ÷ 7,0) Cu = Resto	Moldeo	260	120	18	75
		Centrifu./C.C	300	140	20	85
RG10 "Latón rojo"	Sn = (6,0 ÷ 8,0) P ≤ 0,05 Zn = (3,0 ÷ 5,0) Pb = (5,0 ÷ 7,0) Cu = Resto	Moldeo	280	140	15	80
		Centrifu./C.C	300	170	10	90
Bronces al Pb	Pb = (18,0 ÷ 23,0) Sn = (6,0 ÷ 8,0) Cu = Resto	Moldeo	200	100	10	55
	Pb = (4,0 ÷ 6,0) Sn = (9,0 ÷ 11,0) Cu = Resto	Moldeo	240	140	18	85
Bronce de Cañón	Sn = (8,0 ÷ 10,0) Zn = (2,0 ÷ 4,0) Cu = Resto	Moldeo	300	—	20	—

*Centrifu = centrifugado; ** C.C. = colada continua;

Tabla 3.III. Bronces de uso más frecuente. Composición y características mecánicas según estado.

en fundición artística y en la fabricación de instrumentos sonoros. En la **tabla 3.III**, vienen indicadas las principales aleaciones comerciales de mayor uso industrial: composición química y características mecánicas según su estado.

El diagrama de fases del sistema cobre-estaño [**Cu-Sn**] es muy complejo. En dicho diagrama solamente se reproduce, por esa complejidad, la parte que concierne a las aleaciones de importancia industrial (**Sn** < 12%); **figura 2.10**.

Para conocer mejor las propiedades que pueden obtenerse con los bronces, en función de su contenido de estaño, es interesante describir las características principales de las diferentes fases que aparecen en el correspondiente diagrama de fases del sistema cobre-estaño [**Cu-Sn**].

La fase alfa (α), grafiada en el diagrama, es muy dúctil y, por tanto, el material correspondiente puede ser deformado plásticamente en frío sin ninguna dificultad. El origen de tan elevada ductilidad y maleabilidad, radica en que al ser una solución sólida de estaño (**Sn**) en cobre (**Cu**), conserva la estructura cristalina cúbica de caras centradas (CCC). Recordemos que dichas estructuras están asociadas a un gran número de posibles sistemas de deslizamiento de máxima calidad, por lo

30 €

206 páginas

40 €

316 páginas

40 €

320 páginas

La aparición en el año 2008 del primer volumen de **TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS**, dedicado a los **Principios del Tratamiento Térmico de los Aceros** marcó un hito en este importante campo de conocimiento para quienes nos hemos dedicado a la Metalurgia. Sus autores, Manuel Antonio Martínez Baena y José María Palacios Repáraz –fue el último libro que se publicó en vida– especialistas conocidos y reconocidos en este campo, nos legaron unas lecciones magistrales reproduciendo y ampliando los artículos publicados en **TRATER Press** y otras revistas especializadas.

Dos años después, el segundo volumen **Aceros de construcción mecánica y su tratamiento térmico. Aceros inoxidables** nos ilustró sobre los aceros de uso mayoritario en la industria y la construcción, con una especial dedicación a los aceros inoxidables y a los mecanismos de corrosión.

Ahora aparece el tercer volumen **Aceros de herramientas para trabajos en frío y en caliente, su selección y tratamiento térmico. Aceros rápidos**. Como en el volumen anterior, el libro está dividido en dos partes. La primera se inicia considerando los criterios actuales de selección de los aceros para la fabricación de útiles y herramientas, las propiedades y características fundamentales que determinan la selección de un acero para herramientas y los factores metalúrgicos y tecnológicos que influyen en el comportamiento de una herramienta. Se añaden algunas consideraciones sobre la teoría y práctica del tratamiento térmico de los aceros aleados de herramientas y luego se particularizan los aceros al carbono para herramientas, los aceros aleados para trabajos en frío y para trabajo en caliente. También se tienen en cuenta una serie de consideraciones sobre los aceros utilizados en la fabricación de útiles y herramientas para la extrusión en caliente, sobre los aceros utilizados en la fabricación de moldes para fundición inyectada y sobre los más utilizados en la fabricación de moldes para la industria de los plásticos. Dada la importancia que tienen, la parte 2 está dedicada exclusivamente a los aceros rápidos, su utilización y tratamiento térmico.

Como los libros precedentes, está firmado por Manuel Antonio Martínez Baena incluyendo a José María Palacios Repáraz quien, aunque nos dejó en 2008, sigue siendo el inspirador del texto. Aunque ambos autores son autoridad en todos los campos de los aceros, se nota su preferencia por el complejo campo de los aceros de herramientas. Sus 187 figuras y 40 tablas son un perfecto indicativo del conocimiento teórico y práctico que tienen de estos aceros. Manuel Antonio, con su gracejo granadino, ha sabido dar amenidad y actualidad a temas tan arduos como los tratamientos criogénicos o los numerosos tratamientos superficiales incluidos CVD, PVD y PECVD.

Puede ver el contenido de los libros y el índice en www.pedeca.es o solicite más información:

Teléf.: 917 817 776

E-mail: pedeca@pedeca.es

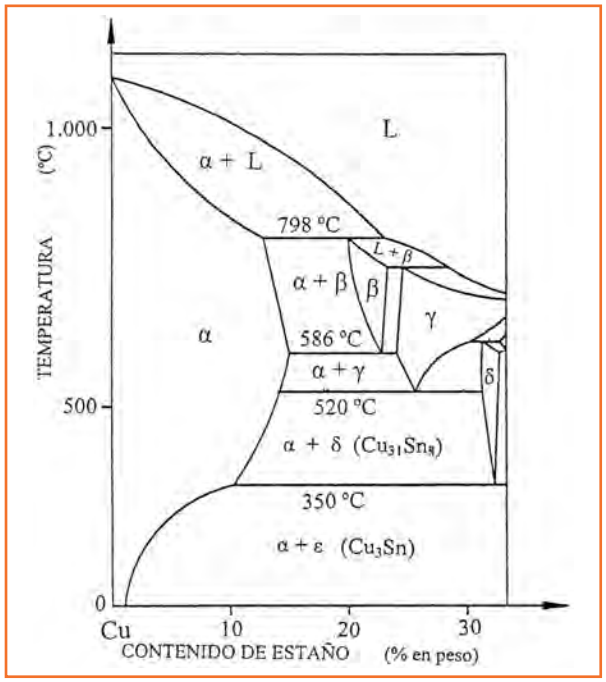


Figura 2.10. Porción del diagrama de fase del sistema cobre-estaño [**Cu-Sn**].

que el material correspondiente adquiere gran capacidad de deformación en frío.

La fase beta (β) es una solución sólida que, debido a su relativamente estrecho margen de solubilidad, suele referenciarse más bien como un compuesto (**Cu_5Sn**) cuya estructura cristalina es cúbica centrada en el cuerpo (CC). Compuesto que sólo se suele manifestar a temperaturas comprendidas entre 586 y 798 °C.

La fase gamma (γ) es similar a la fase beta (β) y, a igual que ésta, no es posible retenerla a temperatura ambiente.

De acuerdo con las características antes mencionadas, para cada una de las fases [**Cu-Sn**], –*lo mismo que ocurre con los latones*– es fácil caracterizar y prever las principales cualidades que van a tener los bronces en función de las fases presentes en su microestructura. Es por ello que estos materiales se suelen clasificar, en primera instancia, en base a las fases que van prevalecer en la masa matricial de dichas aleaciones a temperatura ambiente. De este modo, se pueden clasificar los bronces industriales, dependiendo de los elementos de aleación, en los siguientes grupos: (1) ***bronces ordinarios al estaño***; (2) ***bronces al aluminio***; (3) ***bronces al silicio***; (4) ***bronces al berilio***; y (5) ***bronce al níquel***,. etc.

2.3.1. *Bronces al estaño*

En todas las aleaciones ***cobre-estaño*** [**Cu-Sn**], su resistencia mecánica aumenta con el contenido de estaño (**Sn**), consiguiéndose la máxima resistencia cuando su contenido se aproxima al 20 por 100 (**Sn** ~ 20%) en peso. Alcanzado este punto la resistencia disminuye sustancialmente al incrementarse su contenido (**Sn** > 20%). La solubilidad máxima del estaño (**Sn**) en el cobre (**Cu**) está alrededor del 15 por 100 (**Sn** ~ 15%) en peso.

Los bronces al estaño pueden considerarse también como verdaderos ***bronces al fósforo***, ya que dicho elemento siempre está presente como desoxidante en el proceso de fundición de la aleación. La proporción usual del contenido de fósforo está comprendida entre 0,01 por 100 y 0,50 por 100 [**P** = (0,01 ÷ 0,5%)] y el del estaño entre 1 por 100 y 11 por 100 [**Sn** = (1 ÷ 11%)]. El fósforo en estas aleaciones se separa en partículas duras de **PCu_3**, asociadas con el componente delta (δ) –*ver diagrama* **figura 2.10**– que mejora las propiedades del material.

Los ***bronces al fósforo*** se caracterizan por su interesante tenacidad, alta resistencia a la corrosión en general, bajo coeficiente de fricción y particularmente, fuerte resistencia a la fisuración por corrosión bajo tensión. Se utilizan ampliamente para la fabricación de diafragmas, fuelles, arandelas de sujeción, bujes, discos de embrague y resortes.

Los ***bronces al estaño para moldeo*** con contenidos menores al 7 por 100 de estaño (**Sn** < 7%), cuando se enfría lentamente el material durante el proceso de colada, o bien por deformación en frio y posterior recocido, suelen sólo presentar una única fase, es decir, son aleaciones monofásicas: solución sólida alfa (α) con algunas partículas de solución delta (δ); **figura 2.11**. Ocasionalmente el cinc (**Zn**) se utiliza para sustituir parte del estaño (**Sn**); dando como resultado un aumento significativo en las propiedades de fusión y de tenacidad. A dichas aleaciones generalmente se añade plomo, en una proporción próxima al 25 por 100 (**Pb** ~ 25%), para mejorar la maquinabilidad y la resistencia al desgaste. Bronces que se emplean en la construcción de bujes, cojinetes, etc.; piezas todas ellas sujetas a cargas ligeras y relativamente moderadas.

2.3.2. *Bronces al aluminio*. Cuproaluinios

Los ***cuproaluminios*** son aleaciones con base cobre (**Cu**) que contienen entre 4 por 100 y 11 por 100 de a-

Figura 7.11.- Microestructura de un bronce **95Cu-4Sn-1Zn,** bruto de colada, que se compone de solución alfa (α) y partículas de solución delta (δ): puntos claros.

luminio [**Al** = (4 ÷ 11%)] en peso y, además, pueden incorporar otros elementos, como el hierro (**Fe**), níquel (**Ni**) y manganeso (**Mn**). Modificando la concentración de los aleoelementos se crea una familia de aleaciones con excelentes propiedades de resistencia mecánica y de resistencia a la corrosión. Dichas propiedades, superiores a las que presentan los aceros al carbono suaves, hacen de los bronces al aluminio una de las aleaciones industriales más versátiles que existe. Las propiedades mecánicas de los bronces al aluminio dependen, en gran medida, de su contenido de aluminio (**Al)** y del tratamiento térmico que se les aplica.

En la **figura 2.12** está representada la porción del diagrama de fases del sistema cobre-aluminio **(Cu-Al**). Dicha porción nos muestra, que para concentraciones de aluminio inferiores al 8 por 100 (**Al** ≤ 8%), tales aleaciones presentan una masa matricial compuesta por solución sólida alfa (α) [solución sólida monofásica de aluminio en cobre].

En aquellas concentraciones superiores de aluminio por encima de 8 por 100 y hasta 12 por 100 en peso [**Al** = (> 8 ÷ 12%)] aparece asociada una segunda fase: la fase β. La **Figura 2.13** representa la microestructura del tipo de aleación monofásica alfa (α) en estado de recocido y bruto de colada.

La **Figura 2.14** representa la microestructura del tipo de aleación bifásica alfa + beta [α + β] en estado de recocido y bruto de colada. La máxima concentración de aluminio en la fase sólida alfa (α) se aproxima al 9,5 por 100 (**Al** ~ 9,5%)* a 565 °C, a esta misma temperatura la

* La solubilidad en estado sólido del aluminio (**Al**) en el cobre (**Cu**) es la siguiente: 8% **Al** a 890 °C; 8,5% **Al** a 795 °C; 9,0% **Al** a 690 °C; 9,4% **Al** a 565 °C.

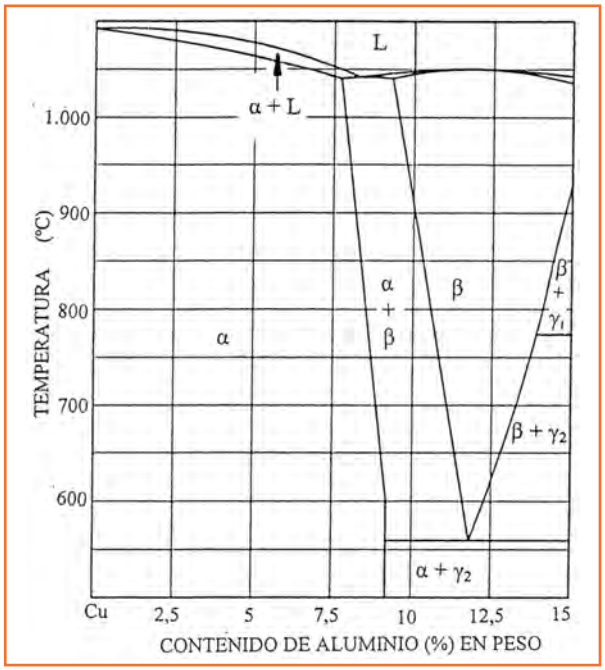


Figura 2.12. Porción del diagrama de fases rica en cobre del sistema cobre-aluminio [**Cu-Al**]. ***Cuproaluminios***.

Figura 2.13. Microestructura de un cuproaluminio **95Cu-5Al**, laminado en frío y recocido que se compone de solución alfa (α) = componente claro, mostrando maclado producto del recocido correspondiente

fase β sufre una reacción eutectoide [$\beta \rightarrow \alpha + \gamma_2$], –*ver diagrama* **figura 2.12**– o bien se transforma en β'dependiendo de la velocidad de enfriamiento aplicada. La **figura 2.15** presenta la microestructura del componente β descompuesto en una solución compleja: $\alpha + \gamma_2$.

Los elementos como el hierro (**Fe**), níquel (**Ni**), manganeso (**Mg**) y silicio (**Si**) se añaden en las siguientes proporciones para alcanzar e incrementar determinadas características mecánicas y tecnológicas:

- El **hierro** entre 0,5 y 5% incrementa la dureza y afina el grano.
- El **níquel** hasta un 5% tiene el mismo efecto que el hierro pero sensiblemente menos efectivo.

Figura 2.14. Microestructura de un cuproaluminio **90Cu-10Al**, bruto de colada que se compone de solución alfa (α) = componente claro y de solución beta (β) = componente oscuro.

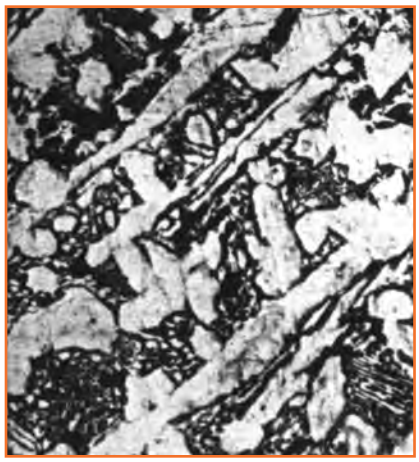


Figura 2.15. Microestructura de un cuproaluminio **95Cu-5Al**, recocido a 700 °C y después enfriado lentamente. El componente beta (β) se ha transformado en una solución compleja [$\alpha + \gamma_2$]: α = componente claro; y γ_2 = componente oscuro.

- El **silicio** hasta el 2% mejora la colabilidad.
- El **manganeso** disminuye la formación de defectos en las piezas fundidas, ya que se combina con los gases y también mejora la resistencia.

El hierro (**Fe**) es el aleoelemento más importante después del aluminio (**Al**); su solubilidad en el cobre (**Cu**) es de 0,5 por 100 por 100 –*solubilidad del* Fe *en el* Cu = (0,5 ÷ 1%) –. El hierro y el aluminio se combinan con aluminio formando fases intermetálicas complejas denominadas: fases kappa (κ). El exceso de hierro incrementa la resistencia del material mediante la precipitación de finísimas partículas de segunda fase. La adición de níquel ocasiona, también, la aparición de precipitados cuya composición y morfología depende de la concentración relativa de níquel y el hierro.

La presencia del hierro (**Fe** = 5%) y del níquel (**Ni** = 5%) modifican el diagrama de fases del sistema binario cobre-aluminio [**Cu-Al**], desplazándolo hacia la derecha y evitando la formación del eutectoide $\beta \rightarrow \alpha + \gamma_2$, como se puede apreciar con más detalle en la porción del diagrama de fases del mencionado sistema cobre-aluminio [**Cu-Al**] modificado. Parte del diagrama, modificado por la adición de hierro (**Fe**) y níquel (**Ni**), –**figura 2.16**– dado que con la acción dichos elementos añadidos al sistema [**Cu-Al**], disminuye la posible fragilidad inducida en el material por la presencia del mencionado precipitado [$\alpha + \gamma_2$]. Desaparecida ya la reacción eutectoide [$\beta \rightarrow \alpha + \gamma_2$] aparece en entonces en el diagrama modificado, una nueva fase adicional denominada kappa (κ) donde se observa, al mismo tiempo, que el campo de alfa (α) se ve ampliado como consecuencia de la disolución alfa (α) por la fase kappa (κ).

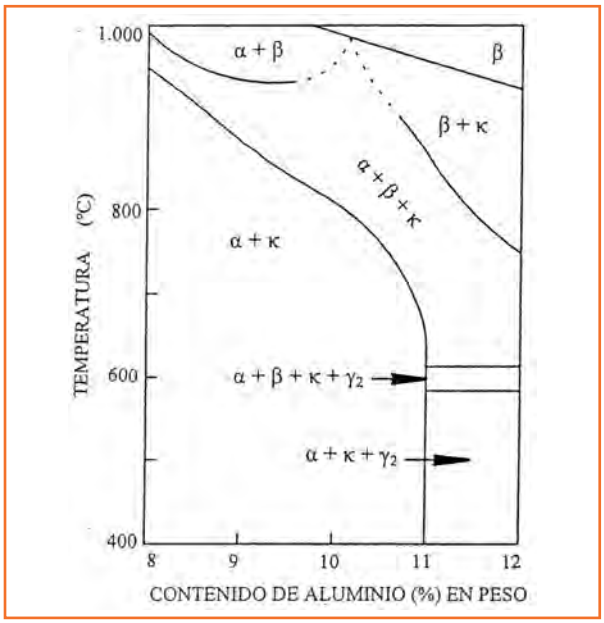


Figura 2.16. Porción del diagrama rico en cobre del sistema cobre-aluminio [**Cu-Al**] modificado [5% **Fe** y 5% **Ni**]. Se evidencia el desplazamiento de fases por la influencia de la adición del hierro y del níque].

Los ***cuproaluminios*** de una sola fase –*fase* α– muestran una gran facilidad de conformación en frío y una muy elevada resistencia mecánica; combinando con una buena resistencia a la corrosión en medios atmosféricos y acuosos. Se utiliza en la fabricación de tubos para condensador, para piezas que se han de conformar prioritariamente en frío, recipientes resistentes a la corrosión, tuercas y tornillos.

Las aleaciones tipo 85,5% **Cu**; 5% **Al**; 9,5% **Ni** son particularmente muy interesantes; ya que se pueden tratar térmicamente –***bonificado***– con el fin de obtener estructuras de tipo martensítico semejantes a las del acero. Cuando el material sufre un calentamiento a una temperatura superior a la eutectoide, con un enfria-

miento posterior lento dentro del horno, se logra una masa matricial o estructura de tipo laminar semejante a la perlita de un acero al carbono (**C** ~ 0,40) normalizado; **figura 2.17**.

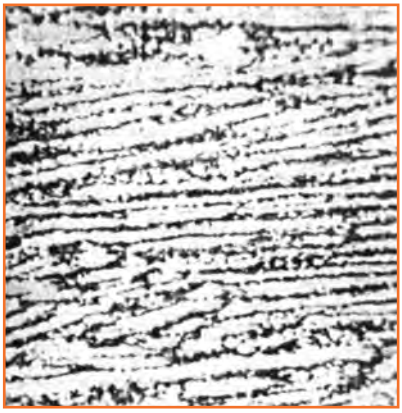


Figura 2.17. Microestructura de un cuproaluminio **90Cu-10Al**, laminado a una temperatura significativamente baja. Se aprecian bandas pronunciadas de solución alfa (α) = componente claro; y de solución beta (β) = componente oscuro. Bandas similares a las que observamos en los aceros de construcción con contenidos medios de carbono (**C** ~ 0,45%).

Cuando estos materiales se calientan a temperaturas próximas a los 900 °C y después se enfrían en agua, se forma una estructura acicular parecida a la martensita del acero templado; **figura 2.18**. Tras el temple, los ***cuproaluminios*** son revenidos a una temperatura comprendida entre los 370 y 590 °C, para aumentar su resistencia y dureza. Cuando se reviene el material a una temperatura próxima a 600 °C se pueden alcanzar resistencias de hasta 750 MPa (**R ≤** 730 MPa), un límite elástico máximo de 350 MPa (**LE** ≤ 350 MPa) y un alargamiento próximo al 15 por 100 (**A** ~ 15%).

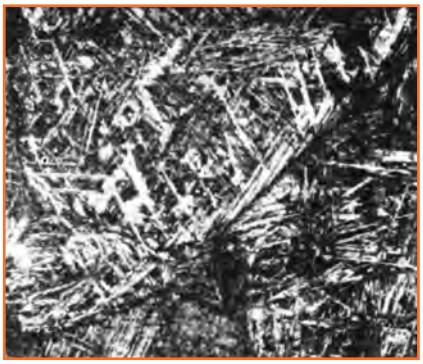


Figura 2.18. Microestructura de un cuproaluminio **90Cu-10Al**, que ha sido templado a una temperatura de 950 °C y enfriado después en agua. Se aprecia una estructura martensítica producida por la separación incipiente del componente alfa (α) = agujas claras; y del componente beta (β) = oscuro.

Los ***cuproaluminios***, tratables térmicamente, se utilizan en la fabricación de: engranajes, ejes motrices, piezas de bomba, cojinetes, bujes, hélices marinas de gran tonelaje, palas de turbinas hidráulicas, herramientas que por golpeo no generan chispas: herramientas para minería.

En la **tabla 2.IV** se indican las composiciones químicas de los ***cuproaluminios*** industrialmente más utilizados, tanto para forja como para moldeo, así como sus características mecánicas según estado.

2.3.3. *Bronces al silicio*. Cuprosilícios

El silicio (**Si**) adicionado al cobre (**Cu**) mejora sustancialmente su resistencia a la tracción, a la resistencia a los ácidos, e incrementa también su capacidad de soldadura. La solubilidad del silicio (**Si**) en cobre (**Cu**) es del 5,30 por 100 (**Si** = 5,30%) a una temperatura de 850 °C, y disminuye con la bajada de temperatura. La reacción eutectoide a una temperatura de 290 °C es muy lenta, por lo que los ***bronces al silicio*** comerciales suelen tener menos de 5 por 100 (**Si** < 5%). Son aleaciones monofásicas de fase α. La porción del diagrama de fases del sistema cobre-silicio [**Cu-Si]** de la **figura 2.19**, muestra la porción rica en cobre de dicho sistema.

Las aleaciones ***cobre-silicio*** se pueden forjar en caliente con cierta facilidad. En este estado presentan una estructura de solución sólida homogénea y buenas propiedades mecánicas, equiparables a las propias de los latones más complejos. Dichas aleaciones son las que alcanzan mayor resistencia mecánica obtenida por los trabajos de deformación y conformación plástica, a los que se somete el material para su puesta en forma. Adquiriendo con ello propiedades mecánicas fuertes, –*en ese estado*– comparables a los aceros de medio carbono y presentado una resistencia a la corrosión comparable a la del cobre. Los ***bronces al silicio***, después de su puesta en forma y hechurado normalmente en frío, para que vuelva su grano aplastado en el proceso de conformación a su tamaño normal, el material tiene que sufrir un recocido, denominado de recristalización, a temperatura por encima de los 450 °C [Tª = (470 ÷ 700 °C)].

Los ***cuprosilícios*** resisten la acción del agua del mar y la acción de la mayoría de sustancias químicas, ácidos, álcalis, y compuestos orgánicos. Resistencia comparable a la del cobre comercial, y a veces ligeramente superior, debido a la tendencia que tienen dichas aleaciones, a formar una capa superficial de sílice muy resistente y protectora. Por ello, se utilizan en fabricación de recipientes y tanques a presión, instrumentos de construcciones marinas, conductos hidráulicos sujetos a presión, intercambiadores de calor, anillos de pistón, etc.

ALEACIÓN Designación EN Simbólica	Composición (%)	ESTADO O/H	Características Mecánicas R MPa	LE MPa	A (%)	HB 10D²
I.- CUPROALUMINIOS PARA FORJA						
Cu-Al5	Al = (4,0 ÷ 6,50) Ni = (0,0 ÷ 0,80) Cu = Resto	O	380	150	55	70
		H16	530	450	15	130
Cu-Al8	Al = (8,0 ÷ 9,0) Ni = (0,0 ÷ 0,80) Cu = Resto	O	420	170	45	85
		H16	570	430	15	140
Cu-AL8Fe3	Al = (6,0 ÷ 8,0) Fe = (2,0 ÷ 4,0) Cu = Resto	O	480	250	40	110
		H16	630	450	20	140
Cu-Al9Mn2	Al = (8,0 ÷ 10,0) Mn = (1,50 ÷ 3,0) Cu = Resto	O	500	200	35	120
		F	520	250	25	160
Cu-Al10Fe3	Al = (8,50 ÷ 10,0) Fe = (2,00 ÷ 4,0) Cu = Resto	F	620	320	18	150
		H12	700	450	10	175
Cu-Al10Fe5Ni5	Al = (9,0 ÷ 11,0) Fe = (4,0 ÷ 6,0) Ni = (4,0 ÷ 6,0) Mn = (0,0 ÷ 2,0) Cu = Resto	F	750	420	15	190
		H12	800	500	12	220
Cu-Al9Fe3Ni6	Al = (8,0 ÷ 11,0) Fe = (1,50 ÷3,50) Ni = (4,0 ÷ 7,0) Mn = (0,50 ÷ 2,0) Cu = Resto	F	600	320	15	150
		H12	750	500	8	210
II.- CUPROALUMINIOS PARA MOLDEO						
Cu-Al9	Cu = (88,0 ÷ 92,0) Al = (8,0 ÷ 10,0)	Moldeo	450	180	25	110
Cu-Al10Fe	Al = (8,5 ÷ 9,8) Fe = (2,0 ÷ 4,0)	Moldeo	550	220	20	135
Cu-Al9Ni	Al = (7,8 ÷11,0) Fe = (4,0 ÷ 6,0) Ni = (4,0 ÷ 6,0)	Moldeo	600	250	25	150
Cu-Al10Ni*	Al = (8,8 ÷10,8) Fe = (4,0 ÷ 6,0) Ni = (4,0 ÷ 6,5)	Moldeo	650	330	18	170
		Centrifuga.	750	380	16	180
Cu-Al1Ni*	Al = (9,0 ÷ 11,0) Fe = (5,0 ÷ 7,0) Ni = (4,5 ÷ 7,0)	Moldeo	750	400	8	190
Cu-Al8Mn*	Al = (7,0 ÷ 9,0) Mn = 5,0 ÷ 6,50) Ni = (1,0 ÷ 2,0)	Moldeo	520	240	26	120

*Las tres últimas aleaciones son usualmente utilizadas en el sector naval: fabricación de hélices de gran tonelaje y maquinaria en general.

Tabla 2.IV. Cuproaluminios de uso más frecuente. Composición química y características mecánicas según estado.

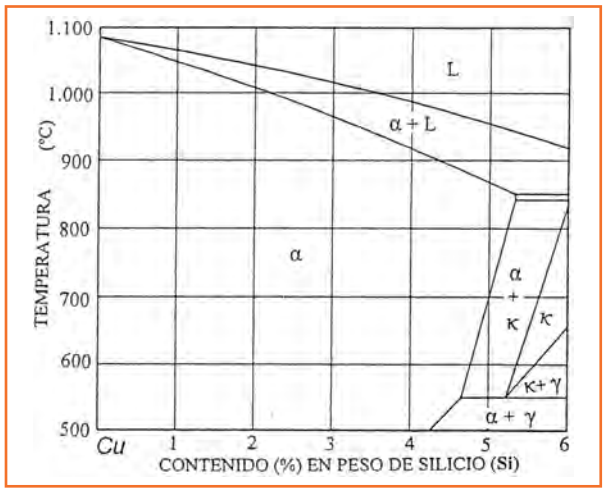


Figura 2.19. Porción rica en cobre del diagrama de fases del sistema cobre-silicio [**Cu-Si**].

Otra aplicación es la fabricación de hilos para telegrafía, con contenidos de silicio entre 0,5 y 3 por 100 [**Si** = (0,5 ÷ 3%)] y pequeñas adiciones de estaño (**Sn** = 1%) y de cinc (**Zn** = 1%); **tabla 2.V**.

% Cu	% Si	R (MPa)	Resistividad (m/mm²)	% IACS
99,50	0,50	500	0,056	28
96,50	3,50	950	0,239	6

Tabla 2.V. Características que se alcanzan en las aleaciones **Cu-Si** que se utilizan en la fabricación de hilo telegráfico.

Cuando a estas aleaciones ***cobre-silicio*** se les añade níquel (**Ni**), en una proporción aproximada de cuatro partes de **Ni** por una de **Si,** -*ver* **tabla 1.I-** ambos elementos se combinan formando **Ni_2Si**; compuesto intermetálico que evidentemente es más soluble en el cobre (**Cu**) a elevadas temperaturas, más que a bajas temperaturas.

La aleación resultante, **Cu-Ni-Si**, tratada térmicamente a una temperatura de solubilización próxima a 700 °C, presenta una masa matricial que después se endurece estructuralmente mediante un tratamiento de maduración a una temperatura de 450 °C, permitiendo al material en servicio trabajar a temperaturas moderadamente elevadas con una mínima pérdida de sus propiedades.

(Continuará)

tenova B.M.I.
El especialista en hornos para tratamientos térmicos al vacío
Temple gas y aceite
Revenido y recocido
Nitruración baja presión
Nitruración iónica
Cementación baja presión
Soldadura brazing
Sinterizado
MIM
APLICACIONES TERMOTECNICAS, S.L - Apdo. 4052 - 48080 BILBAO – ESPAÑA
TEL : 94.426.25.22 FAX: 94.426.22.62
info@aplitec-tt.com ; www.aplitec-tt.com ; www.bmi-fours.com
APLITEC

INGENIERÍA DE REFRACTARIOS Y COMBUSTIÓN
Compromiso y fiabilidad
DEGUISA
www.deguisa.com

TECRESA®
TECNICAS DE REFRACTARIOS, S.A.U.
SEDE CENTRAL BILBAO
Creciendo Juntos
www.tecresa.com
Ribera de Zorrozaurre 15 2º-48015 Bilbao Vizcaya
Tel: 902 118 947 - Fax: 944 483 732
tecresa@tecresa.com
MONTAJE, MANTENIMIENTO, SUMINISTRO, INGENIERÍA DE:
Revestimientos Refractarios Industriales
Pavimentos Industriales, Protección de Superficies,
Reparación y Refuerzo Estructural, Protección Pasiva contra Incendios,
Estudios de Eficiencia Energética.
DELEGACIONES
Pol. Logrezana, Nave 5 Tf: 902 118 948 33438 CARREÑO asturias@tecresa.com
Pol. La Paz, Nave 16 Tf: 902 118 949 21007 HUELVA huelva@tecresa.com
Avda.Rubine Nº6 Pta 4 Loc.1 Tf: 902 118 950 15004 LA CORUÑA galicia@tecresa.com
Ctra.Astillero-Somo Km 2.5 Tf: 942 106 919 39792 GAJANO cantabria@tecresa.com

Flexinox INDUSTRIAL
www.flexinox.com
ESPECIALISTAS EN LA FABRICACIÓN DE ELEMENTOS PARA TRATAMIENTO TÉRMICO Y RECAMBIOS EN ACEROS REFRACTARIOS
TUBOS RADIANTES
MUFLAS
RETORTAS
UTILLAJES
CESTAS Y CRISOLES
CADENAS
REPARACIÓN Y TRANSFORMACIÓN DE HORNOS
(OBRAS REFRECTARIAS)
Representante para España de AUBE-LINDBERG
FILINOX, S.A.
C/ Sant Adrià, 78
08030 Barcelona
Tel.: 93 223 26 82
Fax: 93 223 26 87
customer@inoxidables.com

PYRO® CONTROLE
CHAUVIN ARNOUX GROUP
SSi SUPER SYSTEMS INC.
HITECH INSTRUMENTS LTD
TKK EREMA
TOKAI KONETSU KOGYO CO., LTD.
WINNER TECHNOLOGY CO.,LTD.
주식회사 위너테크
Sondas de oxígeno
Analizadores de gases
Pruebas de uniformidad de temp. AMS2750D, E y CQI9 r3
Sondas de temperatura
Videoregistradores
Reguladores de temperatura
Thyristores
Resistencias CSi y MoSi2
Automatización de hornos
ENTESIS technology
Guitard 72 baixos, E-08014 Barcelona
Tel. (+34) 93 410 54 54, Fax (+34) 93 419 97 33
www.entesis.net · e-mail:info@entesis.net

APLITEC
Utillaje tipo mecano, cestas, tubos radiantes
Fundición acero inoxidable refractario
CFC
CODELE SA
Utillaje forming
ECONOX SA
RD
APLICACIONES TERMOTECNICAS, S.L Apdo. 4052 - 48080 BILBAO - ESPAÑA
Tel: +34. 94.426.25.22 Fax:+34. 94.426.22.62 info@aplitec-tt.com www.aplitec-tt.com

tecno piro®
-temple -soldadura -recocido -sinterizado -revenido
HORNOS DEL VALLES, S.A.
Mancomunitat,3 08290 CERDANYOLA DEL VALLES
(Barcelona) T/ 93 692 66 12 Fax 93 580 08 27
hdv@tecnopiro.com
tecnopiro.com

PROYCOTECME
HORNOS INDUSTRIALES
Especialistas en Tratamiento Térmico
Pol. Ind. Can Castell
c/ Industria, 113 - Nave 1-K
08420 Canovelles (Barcelona) Spain
Teléf.: +34 938 467 984
Fax: +34 938 401 492
www.proycotecme.com

Interbil
Ingeniería Térmica Bilbao s.l.

P.I. Sangróniz, Iberre 1-M5
E-48150 SONDICA (Vizcaya)
Tel.: 94 453 50 78
Fax: 94 453 51 45
bilbao@interbil.es

Ingeniería y Productos para Hornos y Procesos Térmicos

- Ingeniería de Hornos.
- Suministro y fabricación de resistencias.
- Quemadores recuperativos y regenerativos.
- Reguladores de potencia.
- Sistemas de control de procesos.
- Control de atmósferas.

www.interbil.es

ARROLA®
SERVICIO INTEGRAL
PARA INSTALACIONES
DE TRATAMIENTO TERMICO

HORNOS INDUSTRIALES

DISEÑO Y FABRICACION DE INSTALACIONES - ASISTENCIA TECNICA
METROLOGIA Y CALIBRACION - CONTROL DE ATMOSFERA
SISTEMAS INFORMATICOS PARA CONTROL Y REGISTRO DE DATOS

POLIGONO INDUSTRIAL ARGIXAO, PAB. 60
E 20700 ZUMARRAGA (GIPUZKOA) SPAIN
TEL. (+34) 943 72 52 71 FAX. (+34) 943 72 56 34
info@arrola.es www.arrola.es

S. A. METALOGRAFICA
DESDE 1949
TRATAMIENTOS TÉRMICOS

NUESTROS SERVICIOS	CAPACIDADES MÁXIMAS
• TT VACÍO DE: MOLDES, MATRICES Y HERRAMIENTAS • CEMENTACIÓN Y CARBONITRURACIÓN • NITRURACIÓN • NITROVAC-S®: NITROCARBURACIÓN ANTIOXIDANTE • TENIFER: NITRURACIÓN ANTIDESGASTE • TT ACERO RÁPIDO • HIPERTEMPLE • BONIFICADO, RECOCIDO Y NORMALIZADO • OXY-VAPOR®: TT ANTIGRIPANTE • NOXYT®: PAVONADO DURO • ANÁLISIS DE MATERIALES • ASESORAMIENTO METALÚRGICO • CARBOVAC®: CEMENTACIÓN VACIO • IONIT OX®: NITROCARBURACIÓN POR PLASMA	• TEMPLE EN VACÍO: ø 1500 x 2000 mm (Moldes hasta 2500 Kg) • NITRURACIÓN Y • NITROCARBURACIÓN: ø 1000 x 1500 mm • CEMENTACIÓN • CARBONITRURACIÓN • BONIFICADOS: 1600 x 1600 x 700 mm (Piezas hasta 2000 Kg)

Polig. Ind. POLIZUR - Naves 4, 5 y 6
08290 CERDANYOLA (Barcelona)
www.metalografica.com
metalografica@metalografica.com

ACEMSA
Centro Metalográfico de Materiales

C/ Arboleda, 14 - Local 114
28031 MADRID
Tel. : 91 332 52 95
Fax : 91 332 81 46
e-mail : acemsa@gmx.es

Laboratorio de ensayo acreditado por ENAC

- *Laboratorio de ensayo de materiales : análisis químicos, ensayos mecánicos, metalográficos de materiales metálicos y sus uniones soldadas.*
- *Solución a problemas relacionados con fallos y roturas de piezas o componentes metálicos en producción o servicio : calidad de suministro, transformación, conformado, tratamientos térmico, termoquímico, galvánico, uniones soldadas etc.*
- *Puesta a punto de equipos automáticos de soldadura y robótica, y temple superficial por inducción de aceros.*
- *Cursos de fundición inyectada de aluminio y zamak con práctica real de trabajo en la empresa.*

Safe Cronite
L'esprit industriel

Diseño y fabricación de piezas fundidas en aleación de cromo / níquel

Safe Cronite - Ilárraza, 14 - 01192 ILARRAZA (ALAVA)
Tfno.: 609 419 325 - Fax: +33 243 212 463
E-mail: maricarmen.garcia@safe-cronite.com - www.safe-cronite.com

Pometon
Líder en fabricación y desarrollo de granallas y polvos metálicos

Pometon España, SAU
Dr. Bergós s/n
08291 Ripollet (Barcelona) • SPAIN
Tel.: (+34) 935 863 629
Fax: (+34) 936 917 234
info@pometon.net
www.pometon.net

- Gran disponibilidad de modelos.
- Alta variedad de calidades.
- Piezas a medida según plano.
- Tubos radiantes.
- Rodillos.
- Parrillas.
- Cestones/cadenas.
- Muflas/Potes de recocido.
- Recuperadores.

SCHMOLZ + BICKENBACH GUSS GmbH & Co. KG

REPRESENTANTE PARA ESPAÑA Y PORTUGAL:
Tecnymat Aceros, S.L.
Polígono Industrial Ugaldegurren 3 - Parcela 17-2, Nave 1
48170 Zamudio (Vizcaya)
Teléf.: 944 710 035 - Fax: 944 710 227
tecnymat@tecnymat.com

SOLO Switzerland
Hornos industriales para el tratamiento térmico
www.soloswiss.es
SOLO Swiss SA
email : mail@solo.swiss - tel. : +34 656 878 067

- Bombas y sistemas de vacío
- Detección de fugas
- Servicio de alquiler
- Reparación y mantenimiento de cualquier marca, con garantía de 1 año

Especialistas en Tecnologías del Vacío
Leybold
Leybold Hispánica, S.A.
C/ Huelva, 7 · E-08940 Cornellá de Llobregat
T +34 93 666 43 11
F +34 93 666 43 70
info.ba@leybold.com
www.leybold.com

Borel Standard Furnaces & Ovens Switzerland
Hornos industriales y estufas
www.borel-hornos.com
Borel Swiss SA
email : mail@borel.swiss - tel. : +34 656 878 067

HOT técnicas en Hornos HOT S.L.
- HORNOS PARA TRATAMIENTO TÉRMICO
- UTILLAJES, PARRILLAS, CESTAS
- PINTURAS PROTECTORAS
- HORNOS DE LABORATORIO
- DISEÑO, CONSTRUCCION Y ASESORAMIENTO
- SERVICIO TÉCNICO, REPUESTOS

AICHELIN Group
Lohmann Qualität in Edelstahl
Stop off paints LUISO
TECNICAS EN HORNOS HOT S.L.
Polígono Ibaiondo
Pabellón nº 13
20120 Hernani - Spain
e-mail: hot@tecnicashot.com
TF : + 34 943 33 72 33
Fax : + 34 943 33 72 34
Mv. : + 34 609 20 00 90

Termopares especiales
calibraciones ENAC
automatización de procesos
Reguladores
Video-Registradores
pirometro infrarrojo
calibración hornos de vacio
experiencia
desde -200 a 2400ºC
Termopares
SCI Suministro y Calibracion Industrial s.l.
www.sciempresa.com
sondas pt-100
instrumentación
servicio técnico
calibración insitu
cámara termografica
calibración TUS
todo en temperatura
Indicadores
consultoria AMS-2750-D
calibración SAT
expertos en normativa aeronáutica
Ribera de Axpe,11,d2,L203,48950 Erandio tel.944765276 sci@sciempresa.com

insertec
Furnaces & Refractories
Etxerre Kaminoa 21 \
48970 Basauri \
Bizkaia \ Spain
Tel.: +34 - 944 409 420
Fax: +34 - 944 496 624
email: insertec@insertec.biz
www.insertec.biz

HEA
SINCE 1945
HORNOS INDUSTRIALES
www.alferieff • hea@hornoshea.com
Tel: 916396911 • MADRID

SPECTRO
Driven to Discover
Espectrómetros para analizar metales
Espectrometría de arco/chispa para analizar la composición química porcentual (%) de materiales metálicos
Tel. 94 471 04 01 – Fax 94 471 17 41 – comercial@spectro.es
SPECTRO Hispania, S.L.
P.A.E. Asuarán, Edificio Enekuri –Nave 9
48950 ERANDIO (Asua) – Vizcaya
www.spectro.com

INDICE de ANUNCIANTES

ACEMSA 48
BMI 47
APLITEC 47
ARROLA . . . . . Contraportada 4
BAUTERMIC 27
BOREL SWISS 49
DEGUISA 47
ENTESIS 47
FERROFORMA . . . . . Contraportada 3
FLEXINOX 47
HEA . . . . . PORTADA
HORNOS DEL VALLÉS 17
HOT 25
INSERTEC 5
INTERBIL 7
LEYBOLD HISPÁNICA 49
LIBROS TRATAMIENTOS TÉRMICOS . . 41
METALMADRID 28
ONDARLAN 9
POMETON 48
PROYCOTECME 47
S.A. METALOGRÁFICA 48
SAFE 15
SOLO SWISS 49
SPECTRO 49
SUBCONTRATACIÓN . . . . . Contraportada 2
SUMINISTRO Y CALIBRACIÓN 21
TECNYMAT 23
TECRESA 47
TRATER DAY 11
TRATERMAT 13
WHEELABRATOR 48

Próximo número

SEPTIEMBRE

Nº Especial **TRATERMAT**.
Nº Especial **EUROSURFAS** (Barcelona).
Hornos industriales. Espectrómetros. Equipos de control. Quemadores.

SU MEJOR COMUNICACIÓN

REVISTAS PROFESIONALES DEL SECTOR INDUSTRIAL

PEDECA *Press* Publicaciones

SOMOS SU MEDIO

C/ Goya, 20. 1º. • 28001 MADRID • Telf.: 91 781 77 76 • Fax: 91 781 71 26 • pedeca@pedeca.es • www.pedeca.es

PORQUE LA DIFERENCIA SE MARCA DESDE EL PRINCIPIO

EL KNOW HOW UNIDO AL CUIDADO DE LAS PRIMERAS FASES DE FABRICACION MARCAN LA CALIDAD, FIABILIDAD Y DURABILIDAD FINAL DEL PRODUCTO.

MEDIANTE HORNOS DESARROLLADOS, INSTALADOS Y MANTENIDOS POR ARROLA SE FABRICAN COMPONENTES PARA LA MAS ALTA COMPETICION.

ARROLA®

SERVICIO INTEGRAL
PARA INSTALACIONES
DE TRATAMIENTO TERMICO

SERVICIO INTEGRAL

PARA INSTALACIONES DE TRATAMIENTO TERMICO Y GALVANIZADO EN CALIENTE

DISEÑO Y FABRICACION DE INSTALACIONES - ASISTENCIA TECNICA
METROLOGIA Y CALIBRACION - CONTROL DE ATMOSFERA
SISTEMAS INFORMATICOS PARA CONTROL Y REGISTRO DE DATOS

POLIGONO INDUSTRIAL ARGIXAO, PAB. 60
E 20700 ZUMARRAGA (GIPUZKOA) SPAIN
TEL. (+34) 943 72 52 71 FAX. (+34) 943 72 56 34
info@arrola.es www.arrola.es

publiadk