TRATER Press

OCTUBRE 2019 • Nº 73

REVISTA DEL TRATAMIENTO TÉRMICO

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

Part of ADVANCED ENGINEERING | by EASYFAIRS

metalmadrid `19

27 - 28 NOVIEMBRE

FERIA DE MADRID

LA FERIA LÍDER EN INNOVACIÓN INDUSTRIAL

metalmadrid `19

ROBOMATICA

CONNECTED MANUFACTURING

COMPOSITES SPAIN

ADDITIVE MANUFACTURING
New for 2019

REGÍSTRATE ONLINE

Activa tu invitación gratuita en www.entradas.metalmadrid.com
con el código 287 o directamente escaneando el QR inferior

Gold Sponsors

FUCHS · Hoffmann Group · SCHUNK · TRUMPF

Event Partners

lantek · hp 3D Printing · AEMAC · Gear Translations

+34 91 541 24 88 · metalmadrid@easyfairs.com · www.metalmadrid.com

Nuestra Portada

ARROLA diseña instalaciones para el tratamiento térmico de metales férricos y no férricos, dentro de las tecnologías de vacío y atmósfera controlada, con tecnologías innovadoras y adaptadas a los requerimientos solicitados.

Sus soluciones técnicas, la capacidad de servicio y la cercanía al cliente, hace de **ARROLA** un proveedor de instalaciones único dentro del mercado nacional.

ARROLA
Polígono Industrial Argixao, 60 • 20700 ZUMÁRRAGA
GUIPÚZKOA • ESPAÑA
Teléf.: (+34) 943 725 271 • Fax: (+34) 943 725 634
www.arrola.es • info@arrola.es

Sumario • Octubre 2019 - Nº 73

Información

- Cámara térmica industrial de alta temperatura FLIR TG297 **4**
- Fórum de ARCAS - *Por Juan Martínez Arcas* **6**
- Coyuntura del metal - *Por Confemetal* **8**
- Entornos laborales adaptables y sostenibles para la industria del futuro **14**
- Cierra sus puertas InnovAtlántico, la Industria 4.0, pensando en la próxima edición **16**
- Los finalistas del Swedish Steel Price 2019 simbolizan 20 años de ingeniería innovadora **18**
- The Bright World of Metals 2019 THERMPROCESS 2019 **22**
- Algunas consideraciones sobre los aceros de construcción mecánica destinados a la industria automovilística. Aceros microaleados de estructura ferrita-perlita (Parte VII) - *Por Manuel Antonio Martínez Baena* **28**
- Resolución de problemas y Prevención de Agrietamiento en Temple por Inducción de Aceros: Lecciones aprendidas (Parte I) - *Por Gary Doyon, Dr. Valery Rudnev, Randall Minnick y Tim Boussie. Traducido por Eugenio Pardo* **39**

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
Goya, 20, 1º - 28001 Madrid
Teléfono: 917 817 776
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

Cámara térmica industrial de alta temperatura FLIR TG297

FLIR Systems anuncia la cámara térmica industrial FLIR TG297, que ofrece medición de temperatura sin contacto y termografía para profesionales en una sola herramienta. La versátil cámara para solucionar problemas dispone de un filtro único que permite a inspectores de mantenimiento, reparaciones y operaciones, identificar visualmente y encontrar el origen de muchos problemas habituales en aplicaciones de alta temperatura, como calderas, hornos, material refractario y de fabricación.

La FLIR TG297 supera los límites de los termómetros de infrarrojos (IR) puntuales, permitiendo que el usuario vea los puntos calientes y fríos, que suelen indicar posibles problemas y los sigue hasta el origen.

Los usuarios pueden examinarlo todo, desde conexiones eléctricas hasta averías mecánicas con rapidez y precisión, con un rango de temperatura desde -25 a 1.030 °C (de -13 a 1.886 °F). Por lo general, las altas temperaturas aparecen en blanco en las imágenes térmicas, pero la TG297 dispone de un filtro de alta temperatura móvil que mejora el rango térmico dinámico. Con el filtro activado, los usuarios pueden ver los cambios de color que indican diferencias en el extremo más alto del rango de temperatura de la cámara.

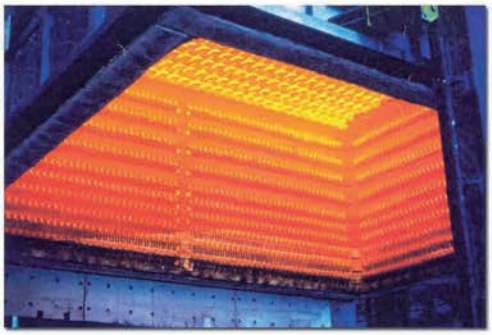
La TG297 se ha diseñado en torno a un sensor térmico FLIR Lepton® de 160 × 120 e incluye algoritmos exclusivos de FLIR de procesamiento de imágenes para conseguir la más alta calidad de imagen. La tecnología de dos cámaras Multi Spectral Dynamic Imaging (MSX™) patentada de FLIR estampa detalles de la cámara visual integrada sobre las imágenes térmicas completas para añadir nitidez y perspectiva. También puede utilizarse la cámara visual para capturar imágenes visuales con una lectura de temperatura integrada.

Los usuarios pueden guardar hasta 50.000 imágenes con 4 gigabytes de memoria flash, para demostrar a los clientes que se ha corregido el problema una vez terminado el trabajo. Con una batería recargable de iones de litio, la cámara funciona durante cinco horas de uso continuo.

La TG297 cuenta con una robusta carcasa IP54 que resiste duros entornos de trabajo. Incluye un puntero láser multipunto para indicar claramente el área medida y una potente linterna LED para ver en zonas oscuras y de difícil acceso.

La tecnología Bluetooth Low Energy (BLE) permite a los usuarios cargar y compartir imágenes en un dispositivo móvil y crear informes sobre el terreno.

Hornos
Laboratorio e industriales



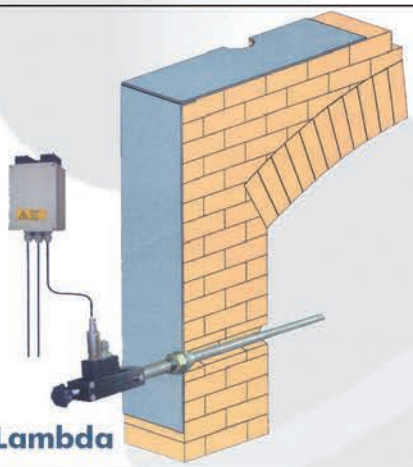
Quemadores
recuperativos y regenerativos

Reguladores de Potencia
a Tyristores:

AEG
Power supply systems

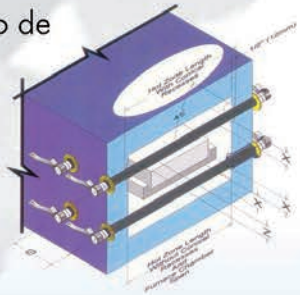
Equipos de control de atmosferas:

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

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

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.

La quinta y última sesión de esta serie y como consecuencia de la consulta realizada por el Sr. José Luis González Santana desde Cuba y desarrollada en los números 67, 69 y 72 de TRATERPress vamos a darla por finalizada con el cuadro esquemático de la página siguiente, y que abarca desde el diseño de la matriz, elección del acero de para la matriz y fabricación, Tratamiento Térmico específico, material a cortar, condiciones de producción y finalmente mantenimiento del conjunto matriz.

En el cuadro se intenta aportar diferentes aspectos de recomendaciones prácticas que cubre todo el esquema como veremos.

Nota importante: Se facilitan algunos datos que consideramos de interés

Material a cortar: Acero tipo 1.231-C675 y con dureza HB-180 equivalente a:

R-62 Kg/mm2

Espesor: 2 m/m

Temperatura de austenización: 1.040 ºC

Dureza de Temple: 62-64 HRC (ver fig. 2 de la Revista nº 69)

Revenido: 520 ºC

Dureza final = 60-62 HRC (QUE ES LA ELEGIDA PARA ESTA OPERACIÓN)

El tipo de instalación para el Tratamiento Térmico elegida es la de hornos de Vacío.

FINALMENTE, COMO SIEMPRE ESTAMOS DISPUESTOS PARA CUALQUIER ACLARACIÓN, AMPLIACIÓN, DUDAS, ETC. QUE CONSIDEREN OPORTUNAS.

DISEÑO DEL UTILLAJE

- Tamaño
- Radios / taladros / esquinas
- Espesor
- Complejidad

ACERO DE LA HERRAMIENTA

- Dureza
- Cantidad, tamaño y distribución de los carburos
- Tenacidad / ductilidad
- Templabilidad
- Otros

TRATAMIENTO TÉRMICO

- Precalentamiento
- Temperatura de austenización / tiempo
- Medios de enfriamiento
- Temperatura de revenido / tiempo / tenacidad / variación dimensional
- Tratamiento sub-cero
- Tratamiento de superficie

FABRICACIÓN DEL UTILLAJE

- Mecanizado
- Mecanizado de alta velocidad
- Mecanizado por electroerosión
- Rectificado
- Pulido
- Soldadura
- Eliminación de tensiones

MATERIAL DE TRABAJO

- Calidad
- Dureza
- Partículas duras
- Ductilidad
- Espesor
- Recubrimientos de superficie
- Polvo (metal/cerámica)

CONDICIONES DE PRODUCCIÓN

- Tolerancia del utillaje
- Lubricación s/n
- Estabilidad de la máquina
- Velocidad de la prensa

MANTENIMIENTO DEL UTILLAJE

- Rectificado – distensión (siesta del acero)
- Limpieza
- Pulido
- Soldadura
- Estabilizado
- Control anomalías

BATALHA / PORTUGAL

3D ADDITIVE EXPO

Feria Internacional de fabricación aditiva
y impresión 3D

19 - 21 MARZO **2020**

PARA MAIS INFORMAÇÃO / FOR MORE INFORMATION:

rogeriohenriques@exposalao.pt 00 351 914 924 726
carlapereira@exposalao.pt 00 351 244 769 492

organização: EXPOSALÃO

HORNOS DE INDUCCIÓN

PARA FORJA INDUCTOFORGE DE INDUCTOTHERM

SOFTWARE I-HAZ

MAXIMIZA PRODUCCIÓN
+ REDUCCIÓN RECHAZOS EN PARADA

SERVICIO TÉCNICO LOCAL

Fabricación y Reparación de Bobinas Local

INDUCTOTHERM GROUP IBERIA
ONDARLAN

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: 2.136.148.217

Coyuntura del metal

Por Confemetal

Actividad Productiva

La producción industrial de Metal, medida con el Índice de Producción del Metal (IPIMET) corregido de efecto calendario, anota en el mes de julio una caída del 3,1% respecto al mismo mes del año anterior, tras el repunte del 1,1% registrado en el mes anterior; en la serie original, disminuyó un 0,3% en julio, mejorando en tres puntos la tasa registrada en el mes anterior (-3,3%).

En EL segundo trimestre del año se registra un incremento del 0,8% en la serie corregida de calendario (3,8% en 2018) y un -2,3% en la serie original (6,6% en 2018).

INDICADORES DE ACTIVIDAD DE LA INDUSTRIA DEL METAL

Tasas de Variación. Índices Base 2015=100

% sobre mismo período del año anterior y sobre series corregidas de efecto calendario.	% variación - Índices de Producción			% variación - Índices de Cifra de Negocios			% variación - Índices de Entrada de Pedidos		
	jul-19	jun-19	ENE-JUL 19	jul-19	jun-19	ENE-JUL 19	jul-19	jun-19	ENE-JUL 19
24. Metalurgia, fab. productos acero, acero y ferroaleaciones	-0,9	-1,0	-3,3	-7,7	-10,6	-4,7	-10,0	-16,6	-6,8
25. Fab. prod.metálicos exepto maquinaria y equipo	2,9	4,2	5,0	0,2	0,4	3,3	1,6	0,2	3,6
26. Fab. prod. informáticos, electrónicos y ópticos	10,2	0,8	8,1	6,6	1,4	4,8	3,2	-2,0	4,1
27. Fabricación de material y equipo eléctrico	-4,4	-8,7	-3,4	-6,3	-3,9	4,7	20,8	-8,4	3,5
28. Fab. de maquinaria y equipo n.c.o.p. (*)	-7,0	0,3	-0,6	-3,4	3,2	-0,3	-2,6	-1,1	3,8
29. Fab. vehículos de motor, remolques y semirremolques	-3,7	2,8	-1,8	-1,2	-0,3	-4,9	-7,3	-3,3	-6,7
30. Fabricación de otro material de transporte	-14,4	4,5	2,0	9,5	4,4	13,7	34,9	145,8	78,7
33. Reparación e instalación de maquinaria y equipo	-4,8	-1,8	0,4	15,7	5,2	9,8	8,2	27,9	18,7
Industria del Metal	**-3,1**	**1,1**	**0,5**	**0,2**	**-0,2**	**1,4**	**1,9**	**5,4**	**7,0**

(*) n.c.o.p.= no clasificado en otra parte. - Fuentes: INE y Confemetal

En el acumulado en el año se registra un incremento del 0,5% en la serie corregida de calendario (3,7% en 2018) y un -0,1% en la serie original (4,4% en 2018).

Por ramas de actividad, en el mes de julio cabe anotar en la serie corregida de efecto calendario el buen comportamiento de la fabricación de los productos informáticos, electrónicos y ópticos, y de productos metálicos, que contrasta con el registro negativo DEL resto de actividades. El Índice de Cifra de Negocios de la Industria del Metal (ICNMET) corregido de efecto calendario, que mide la evolución de la demanda actual y la facturación, aumentó en julio un 0,2% (provisional), tras la tasA de variación del -0,2% de junio.

En el acumulado del año, se anota una tasa de variación positiva del 1,4% (6% en 2018). La evolución de la cifra de negocios, según las ramas de actividad del Metal en el mes de julio, ha sido especialmente positiva en la rama de reparación e instalación de maquinaria y equipo, y de fabricación de otro material de transporte, y negativa en la metalurgia, fabricación de productos de hierro, acero y ferroaleaciones. La fabricación de vehículos a motor muestra por decimoprimer mes consecutivo un resultado negativo.

El Índice de Entrada de Pedidos de la Industria del Metal (IEPMET) corregido de efecto calendario, que mide la evolución de la demanda futura, experimentó un incremento en julio del 1,9% (provisional), tras el aumento del 5,4% registrado en junio, acumulando en lo que va de año un incremento del 7% (4,4% en 2018). La evolución de la entrada de pedidos en el mes de julio ha sido positiva en la rama de fabricación de otro material de transporte y fabricación de material y equipo eléctrico.

Por el lado negativo destaca metalurgia, fabricación de productos de hierro, acero y ferroaleaciones, y la fabricación de vehículos a motor.

Comercio Exterior

Las exportaciones del Sector del Metal en julio aumentaron un 4,4% en comparación al mismo mes del año anterior, frente a la tasa registrada en junio, un 3,5%.

EVOLUCIÓN DE LOS PRECIOS MEDIOS (1) - PRODUCTOS SIDERÚRGICOS
(Índice Base Octubre 2003 = 100)

AÑO 2019	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO
- Perfiles estructurales (HEB)	148	145	144	139	140	140
- Perfiles comerciales (angulares)	145	147	148	144	139	136
- Corrugado	151	147	147	147	143	141
- Chapa laminado frío	158	158	129	153	149	149
- Chapa laminado caliente	168	168	205	162	161	161
- Chapa galvanizada	153	153	153	151	150	150
- Tubos decapados	136	139	136	134	131	131

(1) Estos datos deben tomarse como un índice de tendencia, en ningún caso como referencia firme de precios. Fuente: UAHE

ÍNDICE DEL PRECIO PARA EL ACERO CORRUGADO

Índice Base enero 2014 = 100	mar-19	abr-19	may-19	jun-19	jul-19	ago-19
INDICE	109,13	106,47	106,39	103,87	100,45	100,27
% var. con respecto al mes anterior	2,43%	-2,44%	-0,08%	-2,37%	-3,29%	-0,18%
% variación con respecto al mismo mes del año anterior	-0,84%	-2,40%	0,13%	-1,18%	-6,27%	-8,19%

Fuente: Cámara de Comercio de España

En el acumulado del año 2019, bajaron un 1,5%, en comparación al mismo periodo del año anterior. Por su parte, las importaciones del Metal aumentaron en julio un 1%, frente a un -5,8% en junio, con lo que en año acumulado se registra un incremento de un 1,5%. La diferencia de exportaciones e importaciones da como resultado en julio un saldo comercial negativo de -613 millones, acumulando en el año un déficit de -5.027 millones (-3.448 en 2018).

Por tipos de bienes y para el periodo de enero-julio, las exportaciones de metales comunes y sus manufacturas no experimentan una variación significativa, las de maquinaria, aparatos y material eléctrico suben un 1,8%, las de material de transporte, suben un 1,5% y las de instrumentos mecánicos de precisión suben un 5,4%.

Asimismo, las importaciones de metales comunes y sus manufacturas suben un 0,6%, las de maquinaria, aparatos y material eléctrico, un 6%, las de material de transporte bajan un 3,5%, y las de instrumentos mecánicos de precisión suben un 3,1%.

Mercado Laboral

El número de afiliados a la Seguridad Social en la Industria del Metal alcanzó en el mes de agosto de 2019 la cifra de 779.843 personas, lo que supone 7.904 personas menos con respecto al mes anterior, y 9.596 más que en el mismo mes del año anterior.

En términos relativos, se anota un incremento del 1,2% interanual, una décima más que el registrado en julio. En el segundo trimestre del año se anota un crecimiento interanual del 1,3%, frente al 1,6% del trimestre anterior, y frente al 4,2% anotado en el mismo trimestre del año anterior.

Se alcanza un promedio anual de 778.656 afiliados, un 1,5% superior al crecimiento registrado en el mismo periodo del año anterior.

Según la EPA, el número de ocupados en la Industria del Metal (divisiones CNAE 2009 del 24 al 30 y el 33) alcanzó la cifra de 1.000.700 en el segundo trimestre de 2019, lo que supone una caída del 1,9% respecto al mismo trimestre del año anterior y 19.400 empleos menos que un año antes, y 100 empleos más que en el trimestre anterior.

El número de parados EPA en la Industria del Metal en el segundo trimestre de 2019 alcanzó la cifra de 46.400 personas, lo que supone un aumento del 8,9% en com-

paración al mismo trimestre del año anterior, alcanzándose en la media de año 2019 un total de 52.000 personas desempleadas de media en toda la Industria del Metal, lo que supone un aumento del 5,5% con respecto al año anterior.

La población activa se mantiene por encima del millón de personas (1.047.100), un 1,5% menos que en el mismo trimestre del año anterior. La tasa de paro alcanza el 4,4% de la población activa, desde el 5,4% del trimestre anterior.

Evolución del Mercado de Productos de Acero

Productos Siderúrgicos Largos

La información facilitada por la Unión de Almacenistas de Hierros de España (UAHE) se refiere a la evolución de los precios medios de diversos productos siderúrgicos, referidos a un índice base = 100.

Este índice se calcula en base a los datos obtenidos en los diez primeros días de cada mes. El índice toma como referencia el precio del producto en el mes de octubre de 2003 al que se le da valor 100.

Precios de Acero Corrugado

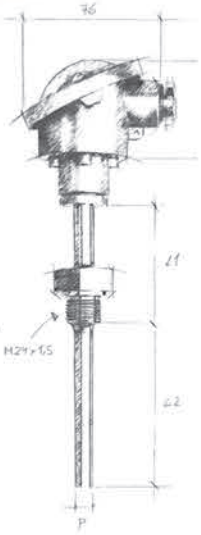
La Cámara de Comercio de España elabora mensualmente el Índice de Precios para el Acero Corrugado en España.

En la elaboración de este índice colaboran las empresas del sector, tanto productores de la materia prima, como demandantes.

El Índice Cámaras del Precio para el Acero Corrugado de agosto de 2019 fue 100,27 puntos, lo que supone una variación del -0,8% respecto al dato de julio (100,45%). Con respecto al mismo mes del año anterior, el Índice de Precios ha disminuido un 8,19%.

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

Entornos laborales adaptables y sostenibles para la industria del futuro

La iniciativa europea A4BLUE, liderada por IK4-TEKNIKER, ha desarrollado mecanismos de automatización que se adecúen a las necesidades del trabajador.

Como escenario piloto Industria 4.0, se ha instalado un entorno colaborativo y adaptativo persona-robot en el centro tecnológico.

La competitividad existente en sectores como el aeronáutico, junto con los incesantes avances tecnológicos, ha provocado que los fabricantes estén sometidos a la presión de tener que elevar sus índices de productividad y desarrollar sistemas productivos dotados de una alta flexibilidad.

Para garantizar la adecuación de todos estos sistemas a las necesidades de los trabajadores, el equipo que lleva a cabo el proyecto europeo A4BLUE, liderado por IK4-TEKNIKER, ha desarrollado y validado una nueva generación de lugares de trabajo adaptables y sostenibles, que hagan frente a los incesantes cambios de requerimientos de los procesos y se adecúen a las características de los trabajadores.

El proyecto, que arrancó en 2016 y finalizó en septiembre de 2019, introduce mecanismos de automatización adaptables para una ejecución eficiente y flexible de las tareas, que permite una interacción persona-máquina segura, así como sistemas de capacitación y asistencia personalizadas para el trabajador en las actividades de montaje, que incluye la realidad aumentada y virtual.

La adaptación no se da únicamente a nivel de las automatizaciones, sino que se extiende a todo el lugar del trabajo y tiene como objetivo adecuarse a las necesidades y perfil del trabajador.

Se basa por tanto, en una arquitectura IoT (Internet of Things) que permite tener en todo momento conocimiento del contexto productivo, mediante la captura de información de los distintos elementos del entorno, como por ejemplo, equipos de automatización, sensores de seguridad, dispositivos para la interacción de la persona con la automatización por voz/gestos y sistemas de gestión de producción.

Asimismo, en el proyecto se han desarrollado metodologías para determinar el grado óptimo de automatización de la planta productiva y evaluar la satisfacción de los trabajadores, además de la usabilidad en los nuevos entornos productivos.

El consorcio que ha trabajado en el proyecto A4BLUE ha testado estos nuevos lugares de trabajo en cuatro entornos reales, en los que las compañías aeronáuticas Airbus y CESA, Compañía Española de Sistemas Aeronáuticos (una división del grupo Héroux-Devtek), la reputada RWTH Aachen University y el propio IK4-TEKNIKER han sido testigos de las implantaciones piloto de validación de los mismos.

Cuatro escenarios para las pruebas piloto

Así, en las instalaciones de IK4-TEKNIKER se ha adecuado un entorno colaborativo persona-robot existente para el montaje de una válvula para el sector aeronáutico.

Alineado con su estrategia de transformación digital de la fábrica, el centro tecnológico ha introducido mecanismos de adaptación del robot a las características del trabajador, capacidades de interacción multimodal (voz y gestos) y asistencia personalizada para la ejecución de la tarea de montaje.

El robot incluye además, mecanismos de seguridad activa en el entorno colaborativo para distinguir entre objetos inanimados y personas para adaptar su comportamiento en consecuencia.

En el caso de Airbus, el escenario seleccionado se ha fundamentado en el montaje de un complejo sistema hidráulico instalado en el panel del ala de un avión.

Por su parte, el líder europeo en equipos fluidomecánicos, CESA, actualmente Héroux-Devtek Spain, ha optimizado el montaje de un actuador hidráulico para el tren de aterrizaje de un avión.

Por último, el caso de RWTH Aachen University se ha centrado en la mejora del montaje final de vehículos eléctricos.

Cierra sus puertas InnovAtlántico, la Industria 4.0, pensando en la próxima edición

El Salón de las Nuevas Soluciones Tecnológicas, InnovAtlántico 4.0, cerró sus puertas en el Tinglado del Puerto de Vigo con la certeza de haber acertado en su planteamiento. El visitante profesional, empresarios, emprendedores, técnicos y estudiantes universitarios que pudieron conocer de una parte, las aplicaciones ya conocidas de estas nuevas tecnologías y, por la otra, conocer nuevas posibilidades accesibles a emprendedores y empresarios, así como nuevas vías de negocio o de apoyo a la producción. En este sentido, InnovAtlántico 4.0 representó una oportunidad tanto para las empresas que desarrollan estas innovaciones

tecnológicas, como para la que ofrecen servicios en los que se utilicen estas nuevas herramientas.

Para Raquel Robledo, directora de InnovAtlántico, "las sensaciones no pueden ser mejores. Los feedback informales de público, expositores y ponentes del Foro Formativos son muy positivos y algunos ya nos han demandado fechas para la próxima edición".

El Tinglado del Puerto de Vigo, acogió la primera edición del Salón de las Nuevas Soluciones Tecnológicas, InnovAtlántico 4.0, donde se reunió un amplio espectro de las novedades relacionadas con la Industria 4.0, o lo que es lo mismo, un nuevo modelo industrial y empresarial cuyo eje son los datos y su manejo e interacción.

Para la delegada de la Xunta en Vigo, Corina Porro "la Xunta de Galicia es muy consciente desde hace tiempo de la importancia de sumar a la industria gallega esta nueva revolución.

Por eso desarrolla la Agenda Industria 4.0. Cuando finalice esta hoja de ruta marcada por la Xunta de Galicia en 2020 habrán sido 20.000 los empleos creados y cerca de 1.400 millones de euros los invertidos".

Según palabras de Oriol Sarmiento, Decano del ICOIIG, "felicito la iniciativa de Innovatlántico por poner en valor a las empresas, proyectos y profesionales de Galicia relacionados con la industria 4.0, destacando el excelente capital humano de nuestra comunidad y la preparación de sus ingenieros."

Para Raquel Robledo, "las bases de este salón, en el que tienen cabida todos los sectores susceptibles de avanzar en la adopción de sistemas que comparten una misma enseña: La Industria 4.0, va a ser ampliada y mejorada en la próxima edición, en la que nos ponemos a trabajar de inmediato".

Para Robledo "la existencia de una cita anual para la puesta en común y la muestra de tecnología e innovación incentiva un escenario idóneo para la generación de negocio, para el intercambio de experiencias y para la poner en contacto a los técnicos, investigadores e inversores que se concentran en este área o que acudan de otras zonas de España y Europa.".

Los finalistas del Swedish Steel Price 2019 simbolizan 20 años de ingeniería innovadora

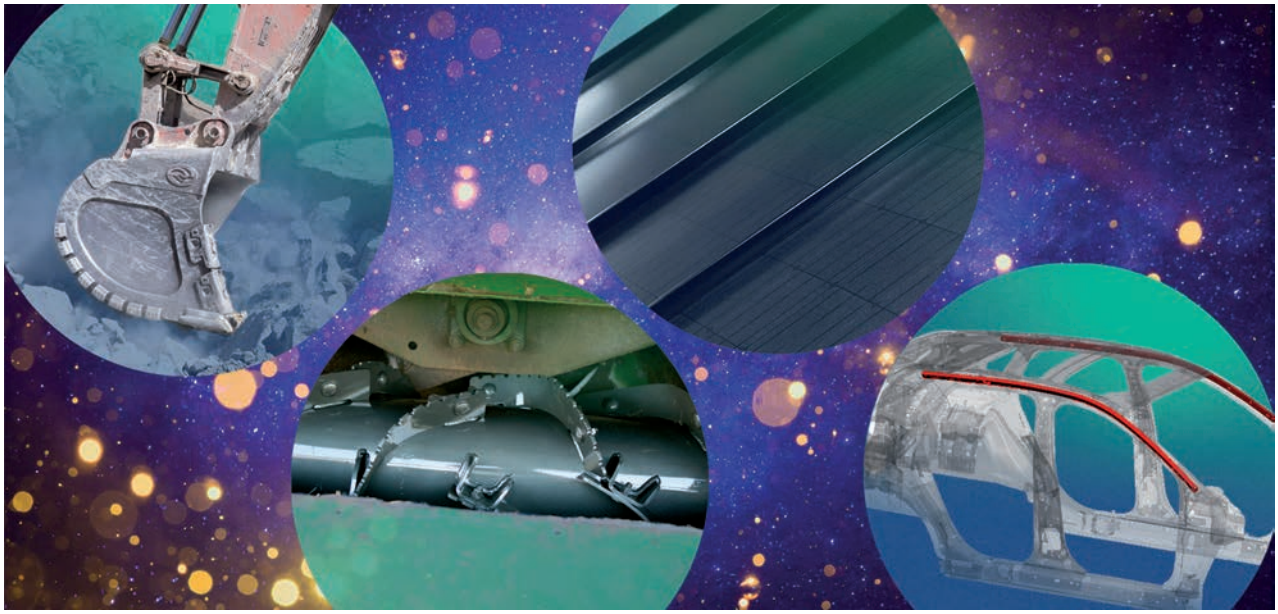
Los finalistas del Swedish Steel Price 2019 ya han sido nombrados e incluyen cuatro revolucionarios conceptos de diseño, que utilizan plenamente las características del acero de primera calidad dentro de la gama de productos de SSAB. El ganador será anunciado en una ceremonia en Estocolmo el 14 de noviembre, que celebra el 20º aniversario del Swedish Steel Price.

Para el 20º aniversario del Swedish Steel Price, los cuatro finalistas que hemos nominado tienen cada uno una fuerte conexión con un futuro más fuerte, más ligero y más sostenible. Todos ellos demuestran que con nuevas perspectivas y pensamiento innovador surgen posibilidades de seguir avanzando, impulsando no solo a su propia industria sino también a la sociedad en su conjunto", afirma Eva Petursson, presidenta del jurado del Swedish Steel Price y responsable de investigación e innovación de SSAB.

Los cuatro finalistas y los motivos que han llevado al jurado a nominarlos son:

Austin Engineering, Australia

Austin Engineering ha dado un salto significativo en innovación para el diseño y mantenimiento de cucharas exca-



Los cuatro finalistas.

Austin Engineering, Australia.

Kampag, Brazil.

vadoras. Con un enfoque modular, han desarrollado un concepto innovador que combina el bajo peso con el uso óptimo del producto completo antes del desguace. La solución utiliza las características del acero de alta resistencia y resistencia al desgaste, y tiene barreras extremadamente bajas para su implementación. Esto claramente abre la puerta a más innovaciones en el diseño de la cuchara.

Kampag, Brasil

Kampag ha conseguido aumentar el rendimiento de la soja centrando el diseño de su cosechadora en un tratamiento más suave de la cosecha. Una unidad de alimentación única permite reducir los daños en el grano cosechado y aumenta la disponibilidad de la máquina en condiciones de alta humedad. Se han obtenido beneficios adicionales de productividad y sostenibilidad al cambiar a un acero de alta resistencia y resistente al desgaste, incluyendo una mayor vida útil, un peso reducido y una producción más ajustada, así como procesos de mantenimiento con ahorro de energía.

Roofit.solar, Estonia

Roofit.solar fabrica techos solares metálicos que producen electricidad. El producto combina con éxito una so-

Roofit.solar, Estonia.

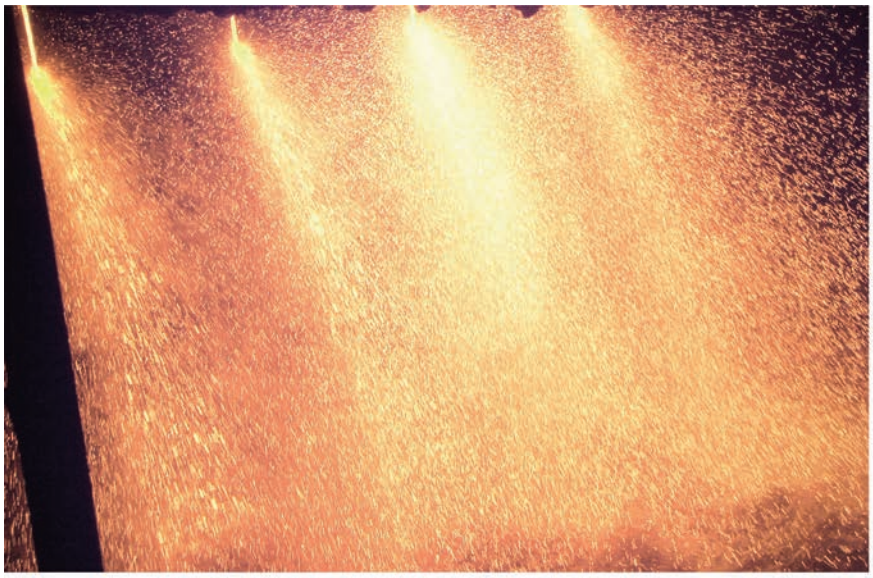
lución eficaz de paneles solares, con una cubierta de acero amable con el medio ambiente y arquitectónicamente atractiva que también permite que las restauraciones de edificios históricos se beneficien de los nuevos avances tecnológicos.

Utilizando un recubrimiento de color basado en aceite de colza, ha sido posible sobrepasar los límites de la tecnología de producción y el resultado muestra una excelente y robusta adhesión entre las capas del panel solar del techo.

Shape Corporation, USA.

Shape Corporation, Estados Unidos

Shape ha desarrollado un proceso de fabricación rentable y robusto para tubos con forma tridimensional, que hace posible utilizar aceros para conformado en frío con los más altos niveles de resistencia existentes en la actualidad. Con esta tecnología, una solución única y ligera para tubos de raíl de techo y montante A, con un tamaño de sección mínimo, está ahora lista para ser implementada por un importante fabricante de automóviles durante el año 2020. Esta innovación pionera desafiará a otros materiales ligeros con una solución de acero mucho más sostenible, que permite flujos circulares de material.



Abrasivo de acero de alta calidad para granallado.

La tecnología de Ervin para abrasivos con alto contenido de carbono es la más avanzada del mundo. Ervin fabrica sus productos en Alemania y el Reino Unido de acuerdo con los estándares internacionales SAE e ISO. Nuestro proceso de producción, completamente controlado, garantiza productos uniformes con una microestructura martensítica templada. Los estrictos controles de calidad, combinados con un proceso de producción líder, reducen el consumo y aumentan la transmisión de energía de la granalla, proporcionando el mejor resultado para nuestros clientes.

ERVIN

Ervin Germany GmbH
T +34 628 531 487
iberia@ervin.eu

The World Standard for Quality

www.ervin.eu

The Bright World of Metals THERMPROCESS 2019

Tras cinco días de intensa actividad, el sábado 29 de junio se clausuró la feria «Bright World of Metals», afianzando con creces su posición de líder internacional como la plataforma de ferias más importante a nivel mundia,l para la metalurgia y la tecnología de fundición. Los doce pabellones del recinto ferial de Düsseldorf que albergaron la feria, se han caracterizado por un ambiente muy dinámico, marcado por un gran número de inversiones, acuerdos comerciales espontáneos y un animado intercambio y transferencia de conocimientos entre expositores y visitantes profesionales.

Tanto desde el punto de vista de los expositores como de los visitantes, las ferias GIFA, METEC, THERMPROCESS & NEWCAST lograron buenos resultados. Cabe destacar que una vez más se ha intensificado su carácter internacional en comparación con las anteriores ediciones, alcanzando una cuota del 70 por ciento entre los expositores (2015: 65 por ciento) y 66 por ciento entre los visitantes (2015: 62 por ciento)

Factores del éxito: carácter internacional y capacidad de decisión

«Con unos 2.360 expositores de todo el mundo, GIFA, METEC, THERMPROCESS & NEWCAST cubren prácticamente todo el mercado internacional. «Están representados tanto los actores globales como pequeñas empresas innovadoras de nueva creación y proveedores de tecnologías de nicho», apunta Friedrich-Georg Kehrer, Global Portfolio Director Metals and Flow Technologies de Messe Düsseldorf GmbH.

Unos 72.500 visitantes procedentes de 118 países se dieron cita en Düsseldorf durante los cinco días de feria. Particularmente en ultramar, sobre todo en Asia, existe una alta demanda de tecnología europea de metalurgia y fundición. Esto también se refleja en el ranking internacional de países: India y China están por delante, seguidos de Italia, Turquía, Japón, Francia y Rusia. «Este marcado carácter internacional por parte de expositores y visitantes es una garantía de éxito de la «Bright World of Metals» que confiere un toque inconfundible a este cuarteto de ferias. GIFA, METEC, THERMPROCESS & NEWCAST son una visita obligada para los profesionales del metal y de la fundición de todo el mundo», continúa Kehrer.

El segundo factor de éxito importante, además del marcado carácter internacional, es el nivel de los visitantes: más de dos tercios ocupan puestos directivos de nivel medio y alto, participando directamente en las decisiones de inversión. Dr. Ing. Joachim G. Wünning, presidente de THERMPROCESS y director general de WS Wärmeprozesstechnik GmbH, lo corrobora en calidad de expositor: "el ambiente es excelente, «Bright World of Metals» supone un importante impulso a las decisiones de inversión, exactamente lo que nuestra industria necesita".

Cuarteto de ferias: impulsores de megatendencias

La sostenibilidad y la protección del medio ambiente se encuentran entre los temas dominantes de las principales ferias mundiales para el procesamiento de metales en Düsseldorf. En GIFA, METEC, THERMPROCESS y

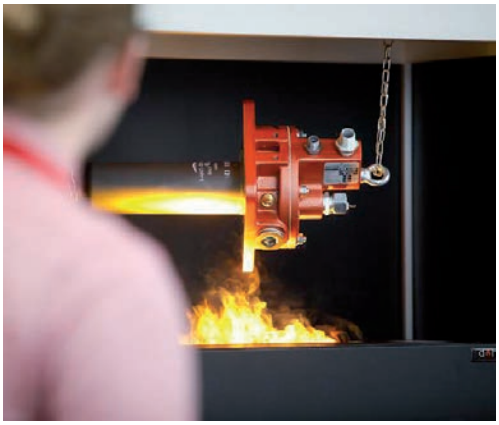
NEWCAST, la industria intensiva en energía muestra hacia dónde se dirige el viaje. Según Jonathan Abbis, Buhler: "Tenemos un objetivo corporativo claro: reducir el uso de energía, así que reduzca en un 50 por ciento y reducir el consumo de agua y los residuos en un 50%". Por lo tanto, esta máquina de fundición a presión requiere solo la mitad de la energía mediante el uso de un motor de bomba moderno.

El gigante grupo SMS de la industria también ha puesto negocios sostenibles en su agenda. Los procesos de impresión 3D de vanguardia, por ejemplo, requieren un 90 por ciento menos de materias primas y son significativamente más eficientes energéticamente. En el futuro, las pequeñas plantas permitirán la producción directamente en el sitio, reduciendo significativamente los costos de transporte. El tema del reciclaje se está desarrollando aún más. El proyecto UrbanGold utiliza un proceso especial para abordar las montañas cada vez mayores de desechos electrónicos. Dr. Ing. Rolf Degel, grupo SMS: "Estamos hablando de un mercado de rápido crecimiento. Hay desechos que ya se procesan hoy, pero también hay muchos desechos que deben almacenarse en vertederos, muy complejos y costosos. Obtenemos casi el 100 por ciento, casi todos los metales realmente importantes de todos los componentes. Todos estos componentes electrónicos contienen metales valiosos como platino, paladio, oro, níquel, cobre, etc. Lo recuperaremos como metal de alta pureza".

Además de la eficiencia energética y la conservación de recursos, otros temas dominaron las conversaciones de más de 72.000 visitantes en el "Bright World of Metals. Friedrich Kehrer, Messe Düsseldorf: "Por supuesto, la tendencia puede destacarse, la digitalización juega un papel muy importante aquí y, por supuesto, el tema de la fabricación aditiva, que ocupa cada vez más espacio en este área.

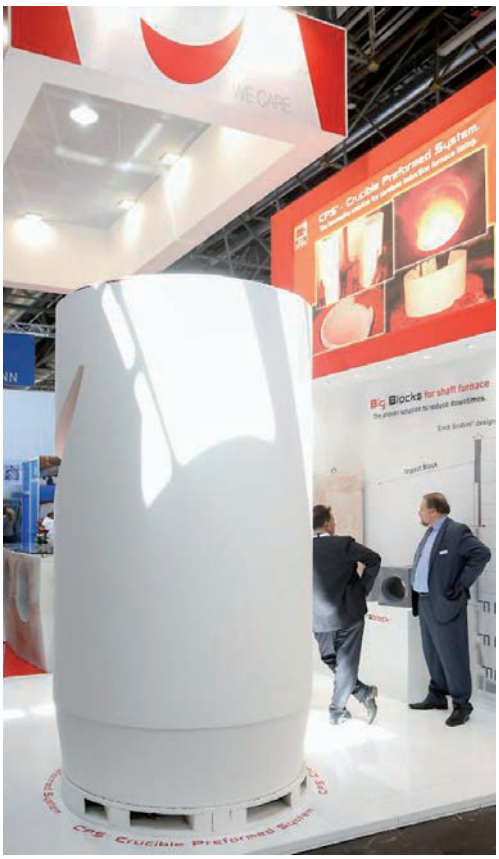
También pudimos dar la bienvenida a visitantes internacionales de todo el mundo y la calidad de estos visitantes profesionales fue una vez más muy alta". Dos tercios de los visitantes e incluso el 70 por ciento de los expositores vinieron del extranjero, lo que subraya la importancia del cuarteto de la feria. India y China están por delante, seguidas de Italia, Turquía, Japón, Francia y Rusia. Pero tienen que esperar hasta 2023 para la próxima reunión en Dusseldorf.

La próxima edición de «Bright World of Metals» con las ferias líderes GIFA, METEC, THERMPROCESS & NEWCAST está prevista para junio de 2023; la fecha exacta se dará a conocer en los próximos meses.



SECO WARWICK
STOP

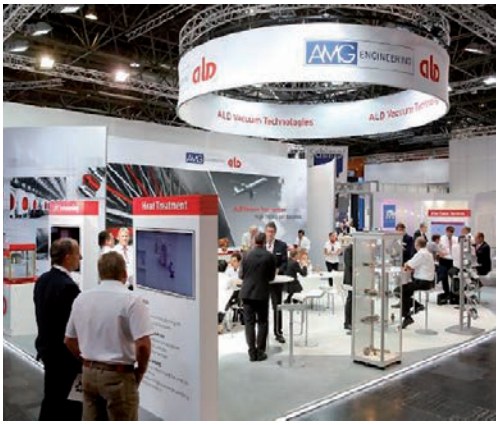
aichelin
bosio


Big Blocks for shaft furnace
CPS - Crucible Preformed System

vhi

INNOVATIVE THERMAL SOLUTIONS
ECM

INDUCTOTHERM GROUP
WHAT YOU MAKE OF IT.
ONDARLAN

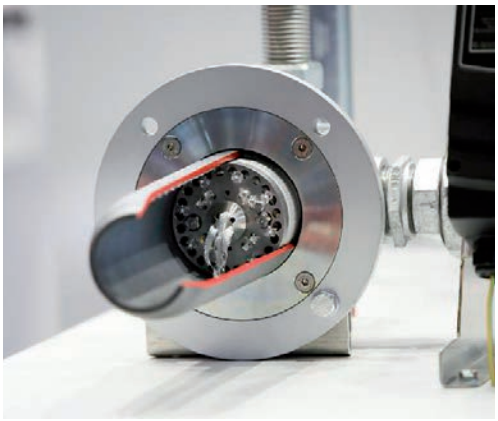

AMG ENGINEERING
alb

promeos
HEATELLIGENCE
WE KNOW HEAT.
Your Process. Our Products. Your Profit.

REFINING
TURN-KEY PROJECT
FURNACES
Al
Cu

Heraeus
Foundry Wireless Instrumentation
DigiTemp-E wireless
Celox-Lab E wireless
Qube T wireless
Qube O wireless

Foundry Service
Ajax Tocco



TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE

VOLÚMEN 1 "PRINCIPIOS DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS ACEROS"

Está ordenado en tres partes. **La primera parte** aborda los conceptos fundamentales que caracterizan las transformaciones que tienen lugar en el acero, tanto en el calentamiento como en el mantenimiento a temperatura de tratamiento, así como en el enfriamiento hasta final de ciclo: diagrama hierro-carbono (Fe-C); diagrama TTT (temperatura-tiempo-trasformación) y diagrama TEC (diagrama de enfriamiento en continuo).

La segunda parte define los tratamientos térmicos másicos: normalizado, recocido, temple revenido, bonificado. Los isotérmicos: austempering, martempering y patentado. Así como los tratamientos subcero y los criogénicos, acentuando los aspectos prácticos de este grupo de tratamientos sin descuidar las bases teóricas de los mismos.

La tercera parte se centra en los tratamientos superficiales: cementación, nitruración, carbonitruración y temples superficiales (temple por inducción, temple a la llama y temple por rayos láser. La importancia creciente y las continuas innovaciones quedan justificadas en los capítulos dedicados a ellos.

VOLÚMEN 2 "ACEROS DE CONSTRUCCIÓN MECÁNICA Y SU TRATAMIENTO TÉRMICO"

Describe de una forma práctica, clara y concisa, todo lo que concierne a los aceros finos de construcción mecánica y también a los aceros inoxidables. El libro está estructurado en dos partes. **La primera parte**, que consta de 9 capítulos, se examinan los aceros al carbono y aleados de temple y revenido, los de cementación y nitruración, los aceros para muelles, los de fácil maquinabilidad y de maquinabilidad mejorada, los aceros microaleados, los aceros para deformación en frío y los aceros para rodamientos. **La segunda parte** está dedicada al estudio de los aceros inoxidables; los dos primeros y extensos capítulos describen los aceros inoxidables y su comportamiento frente a la corrosión. Tras la clasificación de las distintas familias inoxidables, se profundiza en la soldadura de tal grupo de aceros y la relevancia que tiene el tratamiento post soldadura. Con este bagaje, el estudio de los mecanismos de las distintas formas de corrosión es claro y preciso.

El último capítulo está dedicado a los aceros maraging. Se describen los mecanismos del endurecimiento por precipitación de dichas aleaciones, así como los tratamientos más adecuados para alcanzar una extraordinaria y una muy alta tenacidad. Con los tratamientos termoquímicos y térmicos, aplicables a dichas aleaciones, termina el capítulo.

VOLÚMEN 3 "ACEROS DE HERRAMIENTAS PARA TRABAJOS EN FRÍO Y EN CALIENTE, SU SELECCIÓN Y TRATAMIENTO TÉRMICO. ACEROS RÁPIDOS"

Como el volumen 2 está dividido en dos partes, **la primera parte** se inicia haciendo una consideración sobre 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, así como los factores metalúrgicos y tecnológicos que influyen en el comportamiento de las herramientas en servicio. Se discuten algunas consideraciones referentes a la teoría y práctica del tratamiento térmico de los aceros al carbono y de los aceros aleados para herramientas en general

Se profundiza sobre esta gran familia de aceros: aceros al carbono, aceros aleados para trabajos en frío, aceros aleados para trabajos en caliente; particularizándose sobre la extrusión en caliente y la fundición inyectada, así como de los aceros más cualificados para cada uno de sus componentes y herramientas correspondientes. Se analizan, al mismo tiempo, los aceros espaciales para la fabricación de moldes para la industria del plástico.

La segunda parte se destina por entero a una descripción profunda de los aceros rápidos y de su tratamiento térmico; ya que constituyen, por sus características intrínsecas y especiales, una categoría aparte en el contexto de los aceros aleados para herramienta.

VOLÚMEN 4 "FUNDICIONES DE HIERRO Y OTRAS ALEACIONES SUSCEPTIBLES DE TRATAMIENTO TÉRMICO"

La primera parte del libro se refiere a las fundiciones de hierro, pasando revista a las fundiciones grises, a las atruchadas, así como a las blancas; insistiendo en los tratamientos de eliminación de tensiones, de ablandamiento, temple y revenido. Se incluyen también las fundiciones atruchadas y en los distintos tipos de fundiciones maleables; ferríticas, perlíticas, martensíticas o de corazón blanco.

Capítulo aparte merecen las fundiciones especiales: de grafito compacto o esferoidal, así como los tratamientos específicos de estas fundiciones. Igualmente reciben una atención especial las fundiciones ADI en las que se detallan, dada su especificidad, los tratamientos térmicos y un breve comentario sobre calidad ACI y las de calidad AGI.

La segunda parte del libro está dedicada a las aleaciones no férreas, tanto conformadas como fundidas y bonificables o no bonificables.

El **aluminio** y sus aleaciones son tratados con rigor tanto en su composición y propiedades como en los tratamientos térmicos que pueden y, en muchos casos, deben sufrir, ya sean tratamientos de endurecimiento por precipitación, de temple, de solubilización, de maduración o de recocido.

En el **cobre** y sus aleaciones se profundiza en el estudio de sus características principales. Dentro de la variedad de aleaciones de cobre se distinguen tanto los latones como los bronces o los cuproaluminios, cuprosilicios, cuproberilios y cuproníqueles, especificando los distintos recocidos de homogenización o recristalización, eliminación de tensiones, precipitación estructural o temple.

El **titanio** (Ti), metal descubierto en la última década del siglo XVIII. En un principio se tenía como mera curiosidad científica hasta que a mediados del siglo XX, una vez conocida sus excelentes propiedades mecánicas y tecnológicas, se reconoció su potencial como material que presenta, entre otras importantes propiedades, una muy alta relación resistencia/peso. Por su resistencia y relevante dureza, su extraordinario módulo específico, así como su baja densidad [Ti = 4,6 g/cm^3] se utiliza, cada vez más, en la moderna industria aeroespacial, desplazando a las aleaciones de aluminio y a los aceros inoxidables, etc. Su excelente resistencia a la corrosión, muy importante en agua de mar, permite su utilización –bastante generalizada– en la construcción de equipos marinos.

LOS MATERIALES METÁLICOS

Con la aparición del 4º volumen del título general

TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS MATERIALES METÁLICOS

ACEROS Y OTRAS ALEACIONES SUSCEPTIBLES DE TRATAMIENTO TÉRMICO

se cierra el ciclo de esta extensa obra estructurada en 4 volúmenes.

4 VOLÚMENES

VOLÚMEN 4 — 35 €

VOLÚMEN 3 — 40 €

VOLÚMEN 2 — 40 €

VOLÚMEN 1 — 30 €

Puede ver el contenido de los libros y el índice en: www.pedeca.es
o solicite más información en: 91 781 77 76 / pedeca@pedeca.es

Algunas consideraciones sobre los aceros de construcción mecánica destinados a la industria automovilística. Aceros microaleados de estructura ferrita-perlita (Parte VII)

Por Manuel Antonio Martínez Baena, Ingeniero Metalúrgico

7. Introducción

Los aceros microaleados son, básicamente, aceros de construcción clásicos al carbono, a los que se les ha añadido pequeñas cantidades de ciertos elementos de aleación –0,10% *aprox. en peso* y *por aleante*– que se caracterizan por ser fuertes formadores de carburos y nitruros, endurecedores del acero. Los aleoelementos utilizados para tal fin suelen ser: niobio (**Nb**), vanadio (**V**), titanio (**Ti**), y nitrógeno (**N**). El uso combinado, por otra parte, del niobio (**Nb**) y del boro (**B**) ha dado excelentes resultados en aceros para tornillería.

En los clásicos aceros de construcción estándar, las características mecánicas de resistencia y límite elástico se obtienen tras el temple y revenido –*bonificado*– de las piezas correspondientes. Mientras que en los aceros microaleados los niveles de resistencia se consiguen mediante tratamiento termomecánico, laminación o forja, a través de unos mecanismos de endurecimiento diferentes de los habituales. Se intuye y se comprende, por tanto, la ventaja que supone la utilización de estos aceros; sobre todo en lo que se refiere a la simplificación de los procesos de fabricación y producción de piezas, y otros elementos mecánicos.

Los aceros microaleados que estudiamos son aceros de contenido medio de carbono, de estructura ferritico-perlítica, que son a nuestro entender, los más utilizados en el campo de la construcción mecánica; partiendo siempre de productos largos: palanquillas y barras; **tabla 7.I.**

Los primeros aceros microaleados de estructura ferrita-perlita proceden de Alemania, año 1972, y se desarrollaron con el importante objetivo de ahorrarse el costo del tratamiento térmico –*bonificado*– de ciertas piezas estampadas en caliente para el automóvil; **p.ej.**: cubos de rueda, manguetas, cigüeñales, bielas, etc; **figura 7.1.**

En un principio y en lo referente a las propiedades mecánicas, únicamente existían especificaciones con nive-

Acero	%C	%Mn	%Si	%P máx.	%S	%Al	%Ti	%V
17MnV5	0,15÷0,20	1,20÷1,60	≤ 0,50	0,025	≤ 0,040	≤ 0,035	≤ 0,012	0,08÷0,15
22MnV6	0,20÷0,25	1,20÷2,00	≤ 0,50	0,025	≤ 0,040	≤ 0,035	≤ 0,012	0,08÷0,15
27MnSiV S6	0,25÷0,30	1,30÷1,60	0,50÷0,70	0,025	0,030÷ 0,050	0,015÷0,030	0,010÷0,016	0,08÷0,13
49MnSiV S3	0,45÷0,50	0,70÷0,90	≤ 0,50	0,025	0,040÷0,070	0,015÷0,030	0,010÷0,016	0,08÷0,13
38MnSiV S5	0,35÷0,40	0,70÷0,90	0,50÷0,70	0,025	0,040÷0,070	0,015÷0,030	0,010÷0,016	0,08÷0,13
44MnSiV S5	0,35÷0,40	0,70÷0,90	0,50÷0,70	0,025	0,020÷0,040	0,015÷0,030	0,010÷0,016	0,08÷0,13

Tabla 7.I. Composición de los aceros microaleados de estructura ferrita-perlita más representativos.

Figura 7.1. Cigüeñal y mangueta componentes fabricados con acero microaleado de media /alta resistencia.

les mínimos exigidos de resistencia (**R**) y límite elástico 0,2% (**$LE_{0,2}$**), para los aceros microaleados con enfriamiento controlado desde la temperatura final de forja. En aquellos momentos ya se le concedió, también, bastante importancia a la maquinabilidad que debía alcanzar este grupo de aceros.

Las primeras experiencias de elaboración de tales materiales, se hicieron sobre aceros cuya composición media base era la siguiente: **C** = 0,47%; **Mn** = 0,75%; **S** = 0,060%; los elementos microaleantes fueron el niobio (**Nb**) y el vanadio (**V**). Para ello se aprovecharon las experiencias ya vividas en el desarrollo de los aceros microaleados estructurales con más bajos contenidos de carbono: aceros **HSLA*** **=** aceros microaleados de alto límite elástico.

Hay que indicar que los aceros microaleados con adición de niobio (**Nb**), presentan ciertos problemas para situarse dentro de los estrechos márgenes de características de resistencia exigidos. La resistencia a la rotura de los aceros con niobio (**Nb**) se ve muy influenciada por la temperatura de calentamiento previa a la transformación. Hecho que no sucede con los aceros microaleados con vanadio (**V**); cuya curva de resistencia, frente a la temperatura de calentamiento, aparece plana a partir de 1.000 °C; **figura 7.2**. Circunstancia fundamental por la que, normalmente, el vanadio (**V**) ha desplazado al niobio (**Nb**), como elemento microaleante, en este grupo de aceros de estructura ferrita-perlita.

Las modificaciones principales, introducidas en la composición química de los aceros de la **tabla 7.I**, se han realizado con el objeto de mejorar, sobre todo, la tenacidad; característica ésta que ha sido desde siempre, la característica más débil dentro de este grupo de aceros microaleados.

Las modificaciones de composición habidas, –**figura 7.3**–

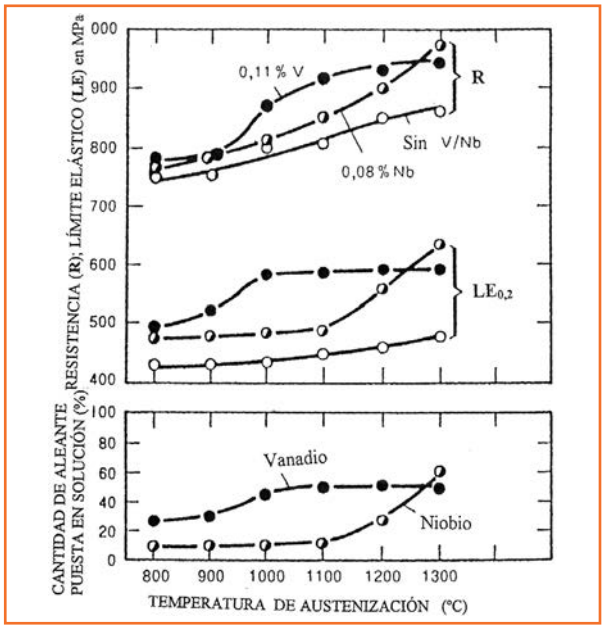


Figura 7.2. Características mecánicas según la cantidad de disolución de la austenita y precipitación de carburos de vanadio (**V**) y de niobio (**Nb**) a baja temperatura, función de la temperatura de austenización.

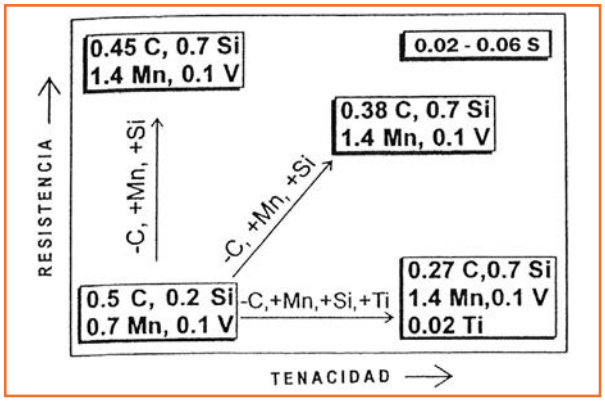


Figura 7.3. Evolución y desarrollo histórico de los aceros microaleados ferrítico–perlíticos.

frente a las composiciones de los primitivos aceros microaleados ferrítico-perlíticos, han sido: (1) contenidos más bajos de carbono (< **C**), conservando los mismos niveles de resistencia a la rotura y límite elástico; (2) aumento de los contenidos de manganeso (> **Mn**) y de silicio (> **Si**); y (3) adición de titanio [**Ti** = (0,010 ÷ 0,016%)] y de aluminio [**Al** = (0,016 ÷ 0,030%)]. Estos últimos microaleantes mantienen el tamaño de grano fino a más altas temperaturas de forja, favoreciendo asimismo, tanto las características de resistencia mecánica como las de tenacidad.

Resumiendo: una buena combinación de las características de resistencia y de tenacidad, necesaria en los ace-

* **HSLA**. Designación anglosajona: acrónimo de High Strength Low Alloy.

ros microaleados de contenido medio de carbono, se consigue principalmente mediante:

- Contenido de carbono (**C**) compatible con la resistencia, pero donde se ha de tener en cuenta la relación entre el nivel de resistencia y la fracción o porcentaje de perlita.
- Contenidos equilibrados de elementos en solución [**Si**, **N**, etc,].
- Contenido relativamente importante de manganeso (**Mn**), elemento éste que baja la temperatura de transformación, favoreciendo la reducción interlaminar de la perlita.
- Tamaño de grano ferrítico fino, favorecido por la presencia en el acero de elementos microaleantes –**V**, **Nb**, **Ti**, etc– y por un control efectivo de los procesos termomecánicos.

7.1. Ventajas que presentan los aceros microaleados de contenido medio de carbono

Las principales ventajas que se derivan del uso y empleo de este grupo de aceros microaleados, frente a los clásicos aceros de construcción estándar bonificables, se puede explicar en base a un eventual ahorro:

- *De energía*. Limitación de los tratamientos térmicos.
- *De materias primas*. Reducción de elementos de aleación.
- *De instalaciones*. Simplificación de las instalaciones de tratamiento térmico.
- *De mano de obra*. La necesaria según la limitación y simplificación de instalaciones.

La **figura 7.4**, compara los procesos de fabricación, hechurado en caliente y tratamiento térmico que, fundamentalmente, se utiliza para ambos grupos de aceros, –*aceros finos de construcción estándar bonificables* y *aceros microaleados de estructura ferrita-perlita*–. En la figura queda patente la simplificación, de carácter operativo, que supone el uso y empleo de aceros microaleados.

7.2. Mecanismos para la obtención y control de las características en los aceros microaleados

El desarrollo de los aceros microaleados tiene sus antecedentes en extensos estudios, teóricos y experimentales, que pretendían valorar los factores que debían considerarse; todo ello con la finalidad principal de mejorar y controlar las propiedades de resistencia mecánica.

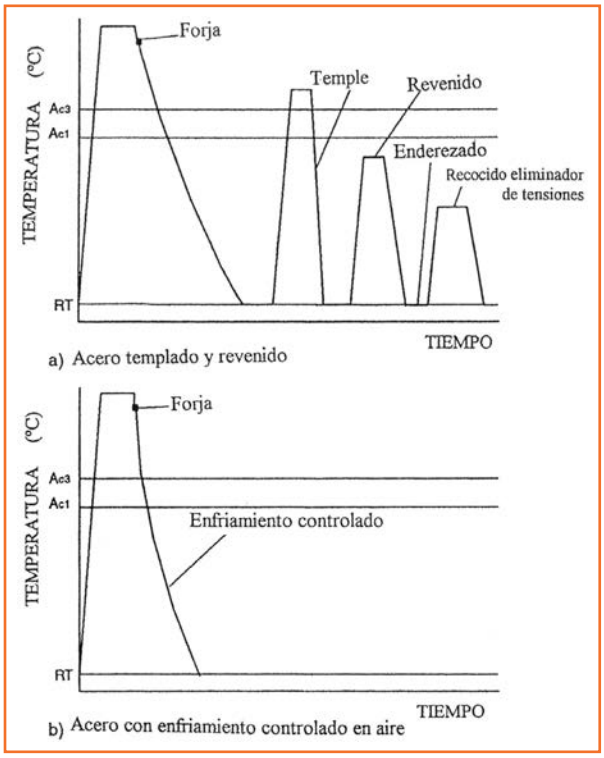


Figura 7.4. Comparación de los procesos de conformación y tratamiento térmico (**a**) acero clásico templado y revenido; (**b**) acero microaleado con enfriamiento controlado.

En el dominio de los aceros microaleados se ha intentado, en numerosas ocasiones, establecer una relación estadística –*sobre bases empíricas*– entre los factores de composición química y microestructurales, con el límite elástico (**LE_{02}**) caracterizado mediante el ensayo de tracción. Como resultado de esos exhaustivos estudios se propuso la ecuación de **HALL*– PETCH**** que relaciona distintas variables con el límite elástico (**LE_{02}**). Del análisis e interpretación de la ley de **HAL–PETCH** se desprende que las características de los aceros microaleados ferrítico-perlíticos, de uso general, pueden ser aumentadas por el efecto específico, o bien combinado, de los siguientes mecanismos:

- Elevación del contenido de la fracción o porcentaje de perlita.
- Endurecimiento de la matriz ferrítica mediante solución de otros elementos (**Mn**; **Si**, etc.).

* Hall, E. O. Proc. Phys. Soc. SeriesB, 64, 747 (1951).
** Petch, N. J. Proc. Swampscott Conf. MIT Press, p, 54 (1955).

- Afino del tamaño de grano ferrítico.
- Precipitación de elementos microaleantes en la matriz ferrítica.

En el afino del tamaño de grano y en la precipitación de elementos microaleantes es, especialmente, donde se ha comprobado la eficacia, con la presencia en la composición química del acero de pequeñas cantidades de vanadio (**V**), niobio (**Nb**), y titanio (**Ti**). Llegando a este punto es necesario recordar, refiriéndonos a los aceros microaleados, la diferencia que existe entre los productos laminados en bandas –*chapa*– y los productos forjados o laminados a partir de palanquilla: barra.

En la chapa es posible obtener un grano fino por laminación controlada y predominará entonces el mecanismo de endurecimiento por afino del tamaño de grano, frente al de precipitación: con el afino de grano de la chapa se consigue una combinación óptima entre tenacidad y resistencia mecánica. En el caso de barras o piezas forjadas, el mecanismo predominante es el endurecimiento por precipitación, que da lugar a una menor tenacidad.

La **figura 7.5** representa de manera gráfica las contribuciones de los diferentes mecanismos, al aumento del límite elástico para ambas formas de material: chapa y productos largos [barras laminadas y productos forjado.

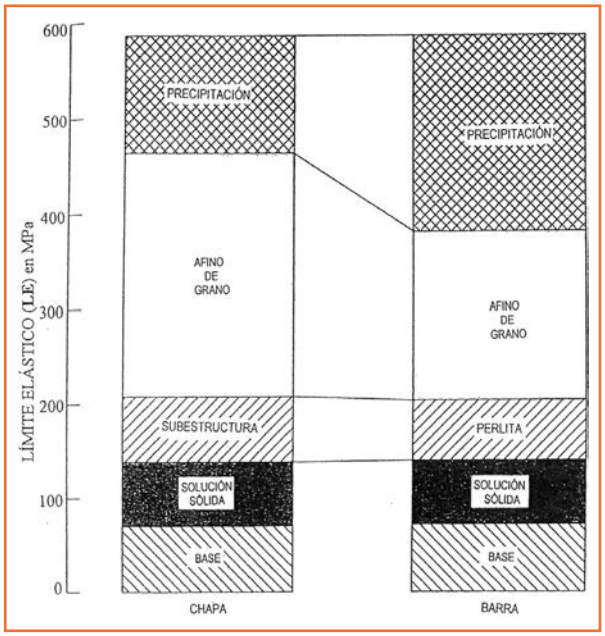


Figura 7.5. Contribución de diferentes mecanismos al endurecimiento y a la mejora del límite elástico en barra y chapa.

7.3. Elementos microaleantes

A nivel general los elementos microaleantes más utilizados son: el vanadio (**V**), el niobio (**Nb**), el titanio (**Ti**) el boro (**B**) y el aluminio (**Al**), etc.; elementos todos ellos que difieren entre sí en sus propiedades y características físicas y químicas. Los efectos beneficiosos que los microaleantes provocan en el acero, se logran a través de la interacción entre la disolución y precipitación de compuestos específicos, durante el trabajo termomecánico de transformación y puesta en forma, y posterior enfriamiento controlado; **tabla 7.II.**

Aunque el aluminio (**Al**) no suele ser considerado, tradicionalmente, como elemento microaleante, por su uso desde antiguo como desoxidante, esto no es impedimento para que sea uno de los mayores fijadores de nitrógeno (**N**) en el acero. Es de vital importancia el trabajo o tratamiento termomecánico aplicado al material para la puesta en forma de las piezas; dependiendo directamente de ello, el nivel de características mecánicas y tecnológicas alcanzado.

Tabla 7.II. Efecto de los elementos microalentes en el acero.

ELEMENTO	ENDURECIMIENTO POR PRECIPITACIÓN	AFINO DE GRANO	RETARDO DE LA RECRISTALIZ.	FIJADOR DE NITRÓGENO	TEMPERATURA DE DISOLUCIÓN °C	TEMPERATURA DE PRECIPITACIÓN °C
V	MUY FUERTE	DEBIL	DEBIL	FUERTE	950	VN = 1000 VC = 700
Ti	NULO < 0,02% FUERTE >0,05%	MUY FUERTE	FUERTE	MUY FUERTE	1250	TIN = 1500 TIC = 1150
Nb	MODERADO	FUERTE	MUY FUERTE	MODERADO	1100	NbCN = 1200 NbC = 1050
Al	MUY DEBIL	FUERTE	MODERADO	FUERTE	1150	ALN = 1200

7.4. Obtención de las propiedades y características de los aceros microaleados

Los aceros microaleados alcanzan sus propiedades, mecánicas y tecnológicas, por el efecto de distintos mecanismos metalúrgicos, producto de la microaleación, junto a un controlado enfriamiento final que sigue al trabajo termomecánico de transformación en piezas.

Las propiedades requeridas, como ya antes se ha indicado, se consiguen básicamente a través de dos mecanismos: (1) afino del tamaño de grano ferrítico, en el producto final; y (2) endurecimiento por la precipitación de los nitruros, carburos y carbonitruros a baja temperatura.

Por cuestiones más o menos económicas es indispensable optimizar tales mecanismos, que son determinantes, dando prioridad a uno sobre el otro según las ocasiones. Ésta es, precisamente, la alternativa de elección y preferencia entre los distintos tratamientos termomecánicos.

Del análisis de esos mecanismos determinantes, a los que antes hemos hecho referencia, *–necesarios para la consecución de las características mecánicas* y *tecnológicas de este grupo de aceros microaleados–* se desprende la importancia de los diferentes aspectos metalúrgicos asociados a ellos; y, también, el importante papel que desempeña el trabajo de transformación y de puesta en forma en caliente: **forja** y **laminación.**

- Efecto de la composición química.
- Influencia de la temperatura de estampado.
- Influencia del grado de deformación.
- Efecto de la velocidad de enfriamiento.

Aspectos todos que son independientes entre sí, pero no por ello deben considerarse de forma aislada.

7.4.1. *Efecto de la composición química*

Se denomina microaleación a las pequeñas cantidades de elementos que permanecen en solución sólida en el acero, y por encima de una determinada temperatura durante la fase austenítica. Elementos que después precipitan, en la fase de enfriamiento, combinándose entonces con otros componentes del acero; una vez que han alcanzado los límites de solubilidad a alta temperatura. Los microaleantes más utilizados son el niobio (**Nb**), el vanadio (**V**), y titanio (**Ti**); que combinados con el carbono (**C**) y el nitrógeno (**N**) forman carburos, nitruros, y carbonitruros. Se adiciona también aluminio (**Al**), que por su gran afinidad con el nitrógeno (**N**) forma nitruros de aluminio.

El aluminio tiene el beneficioso efecto adicional de eliminar el nitrógeno libre, con lo cual se mejora la tenacidad y la temperatura de transición frágil-dúctil del acero correspondiente; **figura 7.6.**

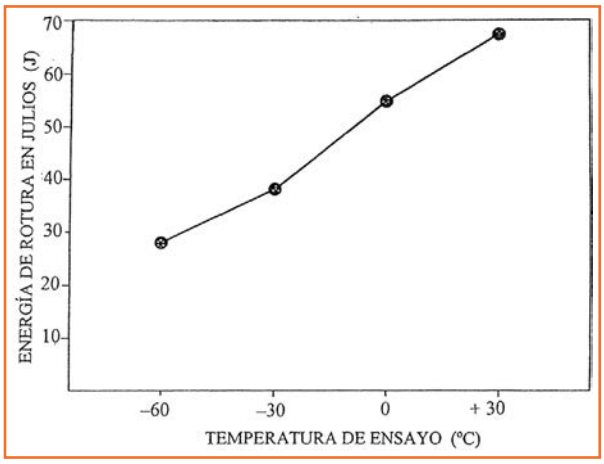


Figura 7.6. Perfil de la energía de rotura según la temperatura de transición. Ensayo de resiliencia **Charpy V** en probeta de **acero 27MnSiVS6**.

Entre las principales propiedades de los aceros microaleados ferrítico-perlíticos hay que destacar: (1) aptitud a la deformación y transformación en caliente; (2) maquinabilidad; (3) soldabilidad; (4) tratamientos térmicos superficiales; y (5) homogeneidad de dureza y estabilidad dimensional: carencia de deformaciones.

7.4.2. *Aptitud a la deformación y a la transformación en caliente*

Los aceros microaleados de estructura ferrita-perlita son utilizados, preferentemente, en la fabricación de piezas forjadas o estampadas en caliente y con destino a la industria del automóvil *–pesada* y *ligera–*. La industria de automoción ha encontrado en ellos un campo de aplicación muy atractivo e interesante, aprovechando las posibilidades que este grupo de aceros proporciona.

Las condiciones de transformación en caliente deben ser las apropiadas. Un factor decisivo es el enfriamiento controlado del grano austenítico, para la obtención de una buena restauración y recristalización durante la fase

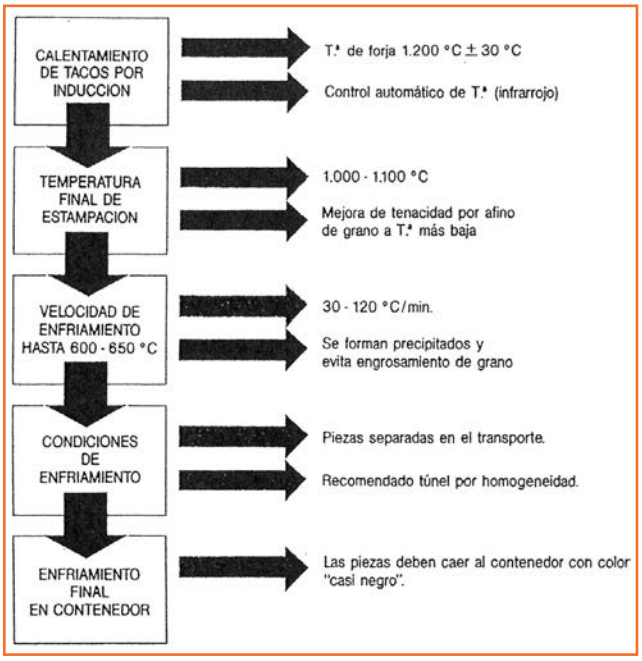


Figura 7.7. Fases del proceso normal de estampación y transformación en caliente de los aceros microaleados de estructura ferrita-perlita.

inmediatamente después de forja. Para ello la temperatura final de forja debe ser la más baja posible [Tª ≤ 1.100 °C] –**figura 7.7**– y el enfriamiento hasta la franja de temperaturas 600 / 650 °C debe iniciarse, enérgicamente, con el fin de no dejar posibilidad alguna de engrosamiento del tamaño de grano, en la etapa de recristalización del material; y, no dando tiempo tampoco, a los microaleantes a que reprecipiten antes de la transformación $\gamma \rightarrow \alpha$.

Por tanto, el enfriamiento final debe ser lo suficientemente rápido para permitir a la austenita transformarse en ferrita-perlita. Es evidente, pues, la decisiva influencia que ejercen estos parámetros sobre las propiedades mecánicas y tecnológicas de los aceros microaleados de medio carbono. Parámetros todos ellos que analizamos a continuación con mayor profundidad:

A. Grado de deformación

El grado de deformación en caliente afecta de forma fundamental al tamaño de grano de la austenita deformada, ya que influye de una manera decisiva en el proceso de restauración y de recristalización del grano.

Cuanto mayor sea la reducción de forja más fino será el tamaño de grano del material conformado, debido a la fragmentación que sufre el grano hasta llegar a una temperatura más baja; punto éste donde la recristalización se hace, también, más lenta.

B. Condiciones de calentamiento

El tamaño de grano austenítico aumenta proporcionalmente con la temperatura de calentamiento; no es conveniente, pues, calentar el acero a temperaturas de forja demasiado elevadas (Tª > 1.200 °C).

La temperatura de trabajo fluctúa entre 1.150 y 1.200 °C, y está en función del proceso de fabricación de la pieza; de tal modo que la temperatura última de transformación en caliente sea compatible con el adecuado proceso final de forja.

La **figura 7.8** muestra, para un determinado tipo de acero microaleado, la influencia que tiene la temperatura de calentamiento de forja, sobre su estructura y propiedades mecánicas.

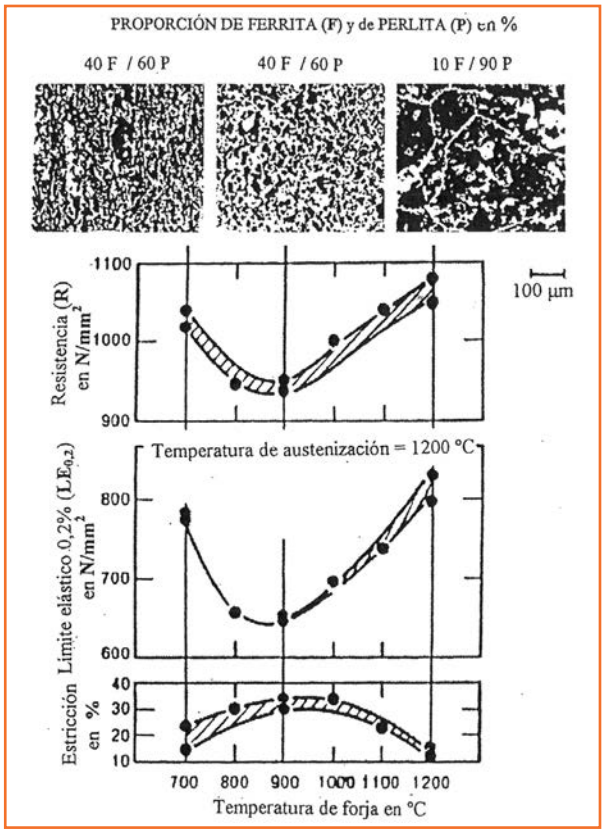


Figura 7.8. Influencia de la temperatura de conformación y de hechurado en caliente sobre la estructura y características mecánicas de la pieza estampada. **Acero 44MnSiVS5**.

C. Temperatura final de forja

La temperatura final de forja ha de ser siempre la más baja posible, compatible con el proceso de conformación. Cuanto más baja es la temperatura de forja, mayor es el efecto de los precipitados, ya que según como se lleve a cabo esa condición de temperatura se alcanzaran, en mayor o menor grado, las propiedades exigidas.

En la práctica se observa un incremento notable de la resistencia a la rotura y de tenacidad, cuando se finaliza la operación de forja a temperatura próxima o más baja de 1.100 °C; ver **figura 7.7**.

D. Enfriamiento de las piezas

Este es uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta. La práctica nos confirma que la velocidad de enfriamiento de las piezas forjadas y conformadas de aceros microaleados al vanadio (**V**), debe estar entre 0,5 °C y 2 °C por segundo [$V_{enf.}$ = (0,5 ÷ 2 °C/s)]; de esta manera se facilita la formación de los precipitados. Tal velocidad corresponde a un enfriamiento en aire calmado, para aquellos materiales cuyos diámetros y/o secciones transversales equivalentes, están comprendidos entre 10 y 60 mm.

Con velocidades mayores de enfriamiento a penas se produce precipitación de los microconstituyentes; y, con velocidades inferiores a 0,50 °C/s los precipitados coalescen: precipitados éstos nocivos y no deseables.

Una sencilla y práctica regla dice: ¨*las piezas salidas calientes de forja deben ponerse negras durante el enfriamiento que sigue a su estampado o puesta en forma, en un tiempo muy próximo* y *máximo a los seis minutos*¨. Para prevenir estructuras indeseables –*bainita*, *troostita*, *martensita*, etc.–, producto de altas velocidades de enfriamiento, el tamaño de grano de los aceros microaleados tiene que ser muy fino.

Resumiendo: durante los procesos de estampación y forja en caliente, se deben materializar las propiedades potenciales que presentan los aceros microaleados ferrítico-perlíticos: (1) por una parte hay que provocar la precipitación de los microconstituyentes que incrementaran la resistencia y el límite elástico, función directa de las fracciones o porcentajes de ferrita y de perlita presentes en el material transformado; y (2), por otra parte, hay que conseguir un tamaño de grano lo más fino posible, para mejorar las características de tenacidad y de ductilidad del material en cuestión; características éstas que son evaluadas, como se sabe, mediante ensayos mecánicos.

7.5. Maquinabilidad

El proceso de fabricación y puesta en forma de las piezas estampadas en caliente, con destino fundamentalmente a la industria del automóvil, finaliza con un mecanizado por arranque de viruta, de mayor o menor importancia. En los aceros microaleados, al igual que en los clásicos aceros de construcción estándar, de temple y revenido, es necesaria una buena aptitud de mecanizado para afrontar tal operación.

Al seleccionar el acero microaleado que se va a destinar a una pieza determinada, deben tenerse en cuenta también, las necesidades de maquinabilidad. La maquinabilidad es un apartado muy importante para la aplicación de estos materiales que presenta, a nuestro juicio, dos aspectos importantes:

- La maquinabilidad de los aceros microaleados de estructura ferrita-perlita, una vez forjados o estampados en caliente, es comparable a la de los clásicos aceros de construcción estándar en estado **bonificado**, –*aceros a los que sustituyen*– siempre y cuando que unos y otros presenten unos niveles de dureza muy similares; y, sean, también, iguales en composición los contenidos de azufre (**S**) o de plomo (**Pb**), si los hubiere.

- Cuando se trata de sustituir al clásico acero de construcción estándar bonificable, que frecuentemente se mecaniza en estado **recocido**, la exigencia de maquinabilidad es mayor. Para soslayar tal dificultad; y, con la finalidad de que las piezas estampadas o forjadas, fabricadas en acero con estructura ferrita-perlita, mecanicen de forma semejante a las obtenidas del clásico acero de construcción en estado **recocido**, –*acero al que sustituyen*– es necesario y aconsejable recurrir a adiciones de elementos que mejoran la maquinabilidad del material microaleado; **p.ej.**: azufre [**S** = (0,040 ÷ 0,070%)] o bien plomo [**Pb** = (0,15 ÷ 0,30%)].

Está del todo comprobado que las altas prestaciones de resistencia, normalmente necesarias en el uso y empleo de los aceros microaleados ferrítico-perlíticos, no resultan alteradas por la adición de elementos que favorecen la maquinabilidad; **p.ej.** el azufre (**S**) y el plomo (**Pb**).

Eso sí, cuando se hayan de fabricar piezas con aceros microaleados al azufre (**S**), se deben globulizar los sulfuros (**MnS**) mediante las adiciones de selenio (**Se**) o bien de teluro (**Te**); preferentemente cuando las piezas tengan exigencias de tenacidad.

7.6. Soldabilidad

Los aceros microaleados son soldables, con las dificultades propias frente a su mayor o menor contenido de carbono. En la fabricación de aquellas piezas que, por necesidad, necesiten de alguna fase de soldadura; los aceros microaleados de estructura ferrita-perlita pueden reemplazar, sin ningún inconveniente y con toda fiabilidad a los clásicos aceros de construcción estándar bonificables [F-1250 (**35CrMo4**)… F-1140 (**C 45**)]; aplicando, eso sí, las mismas precauciones de soldeo. Las características mecánicas no se ven afectadas por la soldadura, incluso los valores de resiliencia, en la zona soldada, son del mismo orden que los del material de partida.

7. 7. Tratamientos térmicos superficiales

Los aceros microaleados ferrítico-perlíticos, de contenido medio de carbono, admiten los tratamientos termoquímicos cuyas temperaturas no sobrepasen los 600 °C; ya que dicha temperatura no afecta para nada, en la práctica, a las características mecánicas de la piezas correspondientes; **figura 7.9**. Por tanto, en las habituales condiciones de ejecución, los tratamientos de **nitruración** son perfectamente aplicables a cualquier tipo de pieza fabricada con este grupo de aceros, consiguiéndose normalmente, durezas superficiales comprendidas entre 550 y 750 vickers [$\mathbf{HV_{30}}$ = (550 ÷ 750)] y capas efectivas nitruradas de hasta 0,5 mm; f**igura 7.10.** Espesores de capa y durezas que van en función del tratamiento de nitruración efectuado.

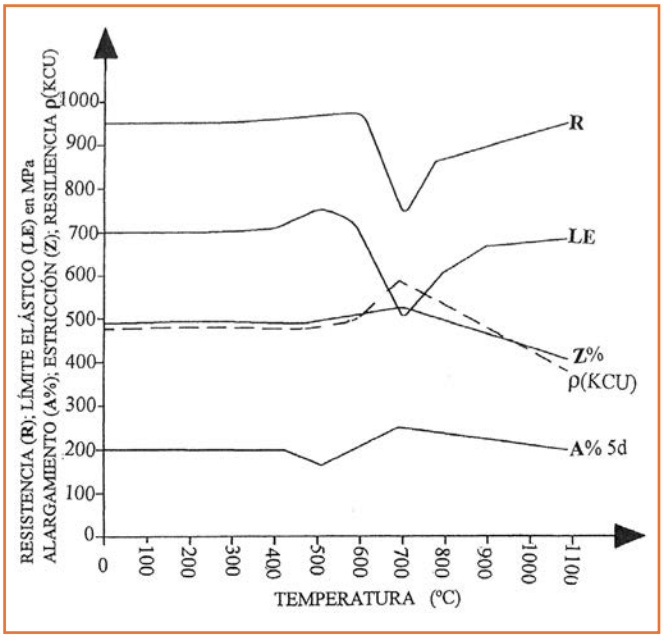


Figura 7.9 Variación de las características mecánicas en función de la temperatura. **Acero 27MnSiVS6**.

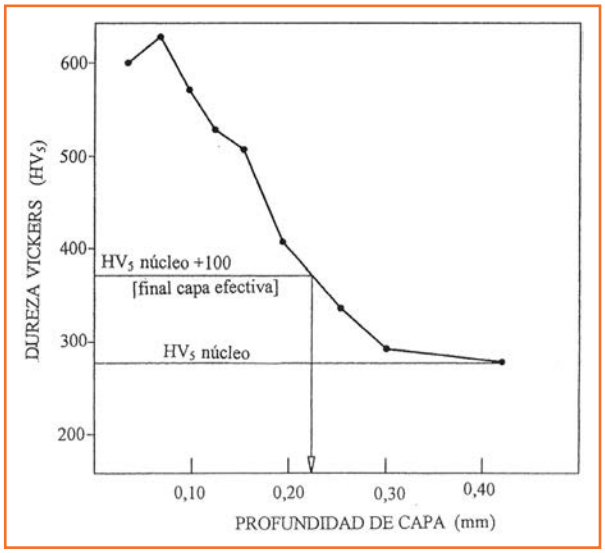


Figura 7.10. Perfil de durezas según la profundidad de capa nitrurada. **Acero 38MnSiVS5**: tratamiento termoquímico de nitruración iónica durante 4 horas a 540 °C.

Los aceros microaleados de estructura ferrita-perlita presentan, igualmente, la misma aptitud al **temple por inducción** que los clásicos aceros de construcción bonificables, ya que a pesar de la alta temperatura de temple [Tª = (900 ÷ 950 °C)]; y, al ser un calentamiento superficial y cuasi instantáneo, no afecta para nada las características mecánicas de la pieza antes de ser ésta templada por inducción.

La dureza de la capa templada va en función del contenido de carbono, a mayor carbono más dureza, pudiéndose alcanzar durezas superficiales comprendidas entre los 45 y 55 HRC; **figura 7.11.** Los ensayos realizados así lo demuestran y reafirman que:

- Los elementos microaleantes no modifican la aptitud al endurecimiento superficial por temple, puesto que la capa endurecida depende básicamente del contenido de carbono: a mayor contenido de carbono en el acero mayor dureza.

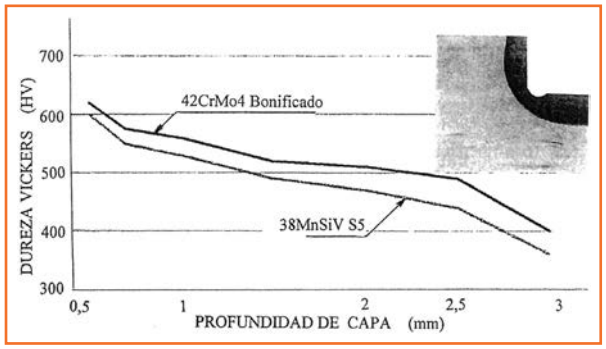


Figura 7.11. Temple por inducción: comportamiento del acero microaleado **38MnSiV S5** frente al acero aleado de construcción bonificable **42CrMo4.** Perfiles de dureza superficial alcanzada y detalle de la profundidad de capa endurecida por inducción.

- Con iguales porcentajes (%) de elementos de aleación, los microaleantes aumentan la templabilidad.

- La resiliencia y tenacidad de la capa endurecida por temple es equivalente a la de los aceros convencionales.

Es evidente que la única exigencia, en la cual se puede implicar un tratamiento térmico referente a los aceros microaleados ferrítico-perlíticos, es el temple por inducción en piezas ya mecanizadas.

Esto hay que tenerlo en cuenta al seleccionar el acero más adecuado para cada aplicación; reafirmando, asimismo, que su comportamiento al endurecimiento superficial por temple es idéntico al de los clásicos aceros de construcción estándar bonificables, con igual contenido de carbono.

Cuando no haya exigencias de temple por inducción se recomienda elegir, para transformación y puesta en forma de las piezas, aceros con el mínimo contenido de carbono posible –*siempre que se alcancen la resistencia* y *el límite elástico solicitados en servicio*–, ya que con más bajos contenidos de carbono en el acero, se consiguen valores de alargamiento y resiliencia mayores.

7. 8. Homogeneidad de dureza

En la metalurgia convencional de los clásicos aceros de construcción estándar bonificables, la dureza de temple va, siempre, unida a la velocidad de enfriamiento alcanzada. Normalmente suele haber una diferencia entre la dureza superficial y la de núcleo del acero templado, cuando se tratan de materiales de cierto espesor –*curvas de templabilidad en* **U**–; y/o, también, entre las secciones transversales delgadas y las más gruesas de una misma pieza.

Por el contrario, en los aceros microaleados existe una elevada insensibilidad a las variaciones de dureza, después de un correcto enfriamiento controlado del material en aire; no importando muy mucho la sección o masa del material procesado.

En efecto la presencia de una juiciosa y armónica proporción de elementos microaleantes, junto con un sistemático enfriamiento controlado del material, después del trabajado en caliente, permite la consecución de características homogéneas, principalmente de dureza, en toda la sección del material: **insensibilidad al efecto de masa.**

La figura 7.12, muestra la dureza medida en Brinell [HB 10/30/3000] sobre barras de acero microaleado, obtenidas de una misma colada, en redondos de 50 y 105 mm de diámetro, en estado bruto de laminación y enfriamiento controlado en aire.

Una consecuencia inmediata de tal homogeneidad atañe, particularmente, a la rectitud y constancia de medidas de las piezas en su posterior mecanizado. La metalurgia de elaboración y puesta a punto de este

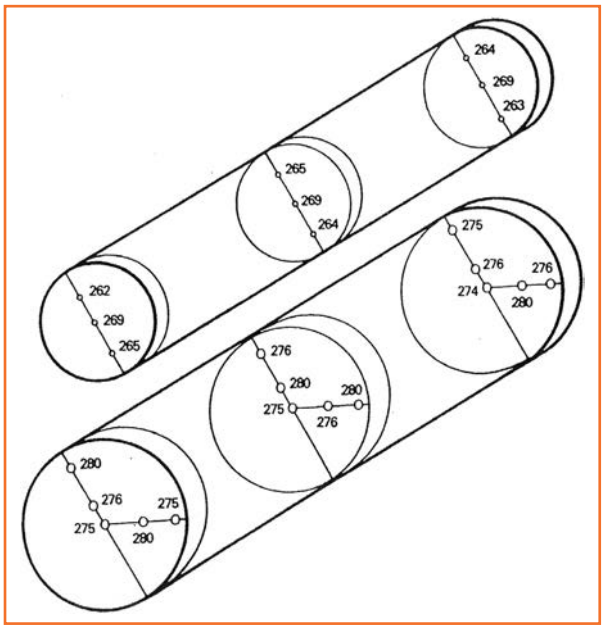


Figura 7.12. Homogeneidad de dureza Brinell en redondos de diámetro 50 y 105 mm de barras laminadas, con enfriamiento controlado, de una misma colada. Acero 49MnSiVS3.

grupo de aceros, hace posible la estabilidad de medidas; evitando prácticamente toda asomo de deformación, durante el mecanizado previo de las piezas con ellos fabricadas.

A diferencia de las deformaciones habidas, y constatadas, en las piezas mecanizadas con los clásicos aceros de construcción estándar: (1) bien sea deformaciones en el mecanizado de barras pretratadas; (2) o bien deformaciones producidas durante el tratamiento térmico, bonificado, de piezas ya mecanizadas.

7. 9. Propiedades mecánicas

Los más bajos valores de resiliencia y tenacidad que se consiguen en los aceros microaleados de estructura ferrita-perlita, frente a los valores de los clásicos aceros de construcción estándar templados y revenidos, a los que sustituyen, no son en la práctica tan decisivos, como tradicionalmente se ha considerado.

Tomando como referencia la medida de la resistencia que ofrece un acero microaleado a la propagación de grietas, evaluada mediante el ensayo de mecánica de fractura, se obtienen resultados con valores muy próximos a los del clásico acero de construcción bonificado, al que normalmente sustituye.

No obstante, aunque siendo el ensayo de mecánica de fractura el más representativo para los requerimientos reales de las piezas en servicio, frente al clásico ensayo de resiliencia por choque. Sin embargo, en la práctica, para evaluar realmente las propiedades de los aceros microaleados ferrítico-perlíticos, en cada una de sus aplicaciones, se someten normalmente a ensayos de vida útil en servicio sobre pieza acabada, sin dejar de realizar los tradicionales ensayos mecánicos: fatiga, tracción y choque.

El comportamiento a fatiga del grupo de aceros microaleados de medio carbono da la medida real, y bastante exacta, de sus posibilidades en servicio. Los resultados que se obtienen son equivalentes a los que encontramos en los clásicos aceros de construcción estándar bonificables, a los que sustituyen; a pesar de obtenerse en los primeros más bajos valores de resiliencia; **figura 7.13.**

Su cuidadosa elaboración y las importantes aportaciones metalúrgicas de los actuales procedimientos de fabricación –*horno-cuchara-vacío* (**HCV**), permiten obtener aceros con unos grados de pureza y de isotropía que mejoran muy mucho los niveles de ductilidad, tenacidad, resistencia a la fatiga, etc. Se confirma, mediante los ensayos realizados, la efectividad de tales mejoras.

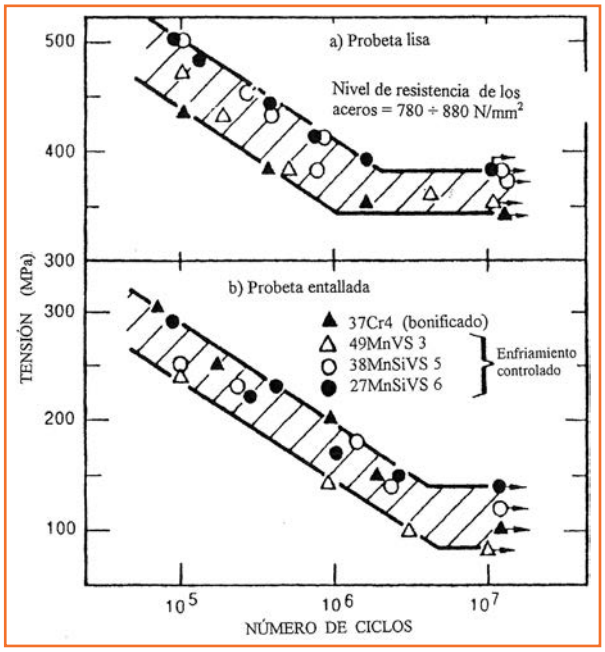


Figura 7.13. Resistencia a la fatiga –*ensayo por flexión rotativa*– de varios aceros microaleados ferrítico-perlíticos de media/alta resistencia en comparación con un clásico acero de construcción estándar. **Acero 37Cr4** templado y revenido.

La tabla **7.III** recoge, solo a título informativo, las características mecánicas de los aceros de estructura ferrita-perlita más representativos. Los valores de límite elástico, alargamiento y resiliencia indicados, se pueden mejorar en función de las condiciones y grado de estampación y forja de las piezas correspondientes, y de las velocidades de enfriamiento final conseguidas. Una

Acero	LE (N/mm²)	R (N/mm²)	A%	Z (%)	KCU (J/cm²)	Niveles de resistencia de empleo R (N/mm²)
17MnV5	> 420	550 ÷ 700	> 22	> 40	> 30	≤ 650
22MnV6	> 450	650 ÷ 800	> 18	> 35	> 25	≤ 750
27MnSiV S6	> 500	750 ÷ 900	> 15	> 30	> 20	≤ 800
49MnSiV S3	> 420	850 ÷ 950	> 8	> 20	> 12	≤ 850
38MnSiV S5	> 550	850 ÷ 1000	> 13	> 25	> 15	≤ 950
44MnSiV S5	> 600	900 ÷ 1050	> 11	> 20	> 12	≤ 1000

Tabla 7.III. Características mecánicas y niveles de resistencia mecánica de empleo.

buena combinación de resistencia a la rotura y tenacidad, normalmente, se consigue mediante:

- Un contenido de carbono (**C**) ponderado compatible con la resistencia; pero teniendo en cuenta, al mismo tiempo, la relación entre el nivel de resistencia y la fracción o volumen de perlita.
- Porcentajes equilibrados de elementos en solución (**Si**, **N**, etc).
- Un contenido relativamente importante de manganeso (**Mn**). Este elemento baja la temperatura de transformación, lo cual favorece la reducción interlaminar de la perlita.
- Un tamaño de grano ferrítico fino, influencia de los elementos microaleantes **V**, **Ti**, etc. y del control efectivo de los tratamientos termomecánicos.

RESUMEN

Como resumen final de todas las consideraciones sobre los aceros microaleados de contenido medio de carbono *–aceros microaleados de estructura ferrita-perlita–* podemos decir que desde principios de los años 1970, el desarrollo de aceros microaleados ha experimentado un notable impulso, como consecuencia de los logros alcanzados en su día con el empleo de elementos microaleantes en aceros estructurales de más bajo carbono: aceros **HSLA.**

La utilización de los aceros microaleados de estructura ferrita-perlita, *–con adecuados niveles de resistencia mecánica* y *un buen comportamiento a la fatiga–* surge como alternativa a los clásicos aceros de construcción mecánica estándar de temple y revenido, utilizados en la fabricación de piezas forjadas por estampa de cierta responsabilidad, con destino al sector de automoción: bielas, cubos de rueda, brazos de suspensión, manivelas, manguetas, cigüeñales, etc.

El interés de emplear aceros microaleados de contenido medio de carbono [**C** = (0,20 ÷ 0,45%)], para resistencias a la rotura entre 700 y 1.100 MPa y con aceptables niveles de tenacidad/resiliencia, *–características estas, principalmente, logradas mediante un adecuado espacio interlaminar de la perlita–* deriva de sus ventajas económicas:

- Menor coste que los clásicos aceros de construcción estándar bonificables, a los que sustituyen.
- Eliminación del temple y del revenido.
- Maquinabilidad, relativamente mejorada.

El efecto favorable de los elementos microaleantes en este grupo de aceros ferrítico-perlíticos, tiene su origen en el endurecimiento estructural producido por los carburos y carbonitruros, cuando todos ellos precipitan desde la fase ferrítica.

El elemento microaleante que más se utiliza es el vanadio (V ≤ 0,20%); esto se debe a que la solubilidad de los carburos de vanadio a la temperatura de forja utilizada [Tª = (1.150 ÷ 1.200 °C)] es más que suficiente. Pero, en cambio, no lo es para el niobio (Nb) ni tampoco para el titanio (Ti), ya que tal temperatura de forja es demasiado baja para la total solución del niobio y el titanio; y, por tanto, existe una gran dificultad de conseguir un mayor endurecimiento del material, dado que apenas hay precipitación de carburos de niobio y/o de titanio.

La solubilidad del vanadio (**V**) a la temperatura normal de forja, y la posterior precipitación de sus carburos desde la fase ferrítica, permite un correcto aumento de dureza y demás características del material; caso que no ocurre con el niobio (**Nb**) ni con el titanio (**Ti**).

El incremento de las características mecánicas *–resistencia* y *límite elástico–* producido por el vanadio (**V**), se debe a su doble influencia en el metal: (1) por una parte el vanadio (**V** ≤ 0,20%) reduce los espacios interlaminares de la perlita; y (2) por otra a igual espacio interlaminar endurece, asimismo, a la perlita al formarse una fina dispersión de carburos de vanadio en la fracción ferrita-perlita.

Complementariamente los aceros microaleados de estructura ferrita-perlita suelen contener hasta 0,02 por 100 de nitrógeno (**N** ≤ 0,02%), ya que el nitrógeno contribuye a la formación de nitruros de vanadio, los cuales intensifican el endurecimiento estructural.

Para una misma resistencia mecánica la contribución del vanadio (**V**), potenciada por el nitrógeno, permite bajar o reducir los contenidos de carbono (< **C**) y aumentar los de manganeso (>**Mn**); con ello se mejora la tenacidad y la ductilidad del material correspondiente.

Contenidos de silicio por debajo de 0,85% (**Si** ≤ 0,80%) resultan, también, beneficiosos debido a su efecto endurecedor al entrar, igualmente, en solución sólida en la ferrita.

Resolución de problemas y Prevención de Agrietamiento en Temple por Inducción de Aceros: Lecciones aprendidas (Parte 1)

En las necesidades del mundo real, los fabricantes de equipos de inducción deberían tener la experiencia y hacer los análisis necesarios a la hora de ayudar a los tratamentistas con sus problemas específicos

Por Gary Doyon, Dr. Valery Rudnev, Randall Minnick y Tim Boussie (Inductoheat Inc., an Inductotherm Group company).
Traducido por Eugenio Pardo (Ondarlan Inductotherm Iberia, an Inductotherm Group company)

Los ingenieros, los diseñadores y los tratamentistas que se inician en las aplicaciones de tratamiento térmico por inducción, necesitan invertir una importante cantidad de tiempo para adquirir conocimiento y experiencia en las peculiaridades de cada aplicación. Subestimar, por parte de neófitos, algunas características específicas de geometría en las piezas y patrones de durezas, así como no tener en cuenta correctamente el impacto de diferentes factores del proceso, nos puede llevar a resultados desastrosos. Encontrar agrietadas las piezas tras el tratamiento térmico realizado resulta frustante, una pérdida de tiempo y, sobre todo, muy caro. El objetivo de este artículo dividido en dos partes es minimizar el impacto de este problema, ayudando a los nuevos profesionales de tratamientos térmicos a mejorar la comprensión de los factores relativos al agrietamiento de los aceros y las acciones encaminadas a evitarlo.

Es importante señalar que la iniciación de grietas en los componentes tratados térmicamente, su crecimiento y su propagación se ven afectados por numerosos factores. Esto incluye especificidades respecto a la geometría de la pieza, su composición química y microestructura, temperaturas de proceso, sutilezas del temple, patrón de durezas, diseño de bobina, magnitud y distribución de tensiones residuales iniciales y transitorias, diseño de utillaje y amarres, etc… Las grietas pueden producirse por un factor único o por una indeseable combinación de varios factores.

Hay infinidad de componentes templados por inducción habitualmente. Algunas geometrías se asocian a tendencias hacia la iniciación de grietas, requiriéndose una selección cuidadosa de las recetas del proceso y del diseño del equipo. Por ejemplo, la Figura 1 nos muestra algunos casos de grietas típicas causadas por recetas de proceso inadecuadas o diseños de bobina inapropiados o también subestimación, por parte de los tratamentistas de determinadas características geométricas de los componentes tratados térmicamente.

Figura 1: Ejemplos de grietas típicas originadas por recetas de proceso o diseños de inductor inadecuados.

Podemos clasificar el agrietamiento y las fracturas de maneras muy diferentes, incluyendo las fracturas dúctiles y frágiles, la iniciación de grietas afectada por las condiciones ambientales, fatiga, inicio retardado de

grietas, y otras muchas. Llegados a este punto es conveniente estudiar un ejemplo.

Ejemplo

Un tratamentista obtiene la producción de una máquina un viernes por la noche. Todos los componentes tratados se revisan y no se observa ningún problema. Los ensayos de Eddy Current y la inspección por partículas magnéticas no revelan la presencia de grietas. Sin embargo, transcurrido el fin de semana, aparecen grietas en un cierto porcentaje de las piezas tratadas que han permanecido en los pallets. Esto es un ejemplo típico de inicio retardado de grietas. Deben tomarse medidas para evitar tales fallos. En otros ejemplos de agrietamiento retardado se observan fracturas durante el montaje de las piezas tratadas térmicamente.

Algunos tratamentistas distinguen entre fracturas transversales, longitudinales o circunferenciales, así como grietas superficiales, subsuperficiales o internas. Por ejemplo, la Figura 2 muestra un agrietamiento subsuperficial, a menudo inapreciable a simple vista, que únicamente una inspección con ensayos no destructivos (inspección por ultrasonidos/acústica) o un examen destructivo pueden descubrir, con objeto de evitar roturas prematuras del componente durante su vida útil.

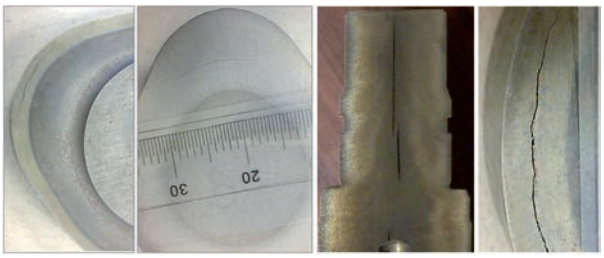


Figura 2: Ejemplos de grietas típicas subsuperficiales, no apreciables, generalmente, a simple vista.

En los últimos años, cada vez son más comunes las iniciativas de aligeramiento de peso en los diseños de automóviles, vehículos industriales y agrícolas además de en la industria aeroespacial y otras. Con objeto de minimizar el peso y el coste de los componentes de acero, los diseñadores eligen utilizar agujeros, reducir espesores, hacer ranuras, cortes, redondear esquinas así como personalizar formas y utilizar aleaciones que permitan alcanzar este objetivo[1]. En ciertos casos, en el intento de reducir costes, los diseñadores proyectan geometrías de pieza más proclives al agrietamiento durante el tratamiento térmico.

A los analistas también les toca estudiar piezas que fallan prematuramente durante su vida útil. ¿A qué se debe? Quizás algo se hizo mal durante el tratamiento térmico; tal vez se utilizó un equipo inadecuado y/o la receta del proceso no se actualizó para los requisitos del patrón de durezas o de las características geométricas de la pieza, obteniéndose, como resultado, un tratamiento térmico erróneo que no es fácilmente detectado.

Factor de la Geometría de la Pieza

El temple por inducción mediante barrido es una de las técnicas más populares para endurecer piezas de acero. Su creciente éxito se asocia con algunas ventajas particulares de esta tecnología, incluyéndose un coste menor de la máquina, pero no limitándose a ello, en comparación con otros procesos alternativos. El temple por inducción mediante barrido ofrece una gran flexibilidad de proceso respecto a la longitud de la pieza y, hasta cierto punto, respecto a variaciones en su diámetro. En el temple por inducción mediante barrido, tanto el inductor como la pieza (o ambos) pueden moverse lineal y relativamente el uno respecto al otro durante el ciclo de temple [2]. Dependiendo del flujo de trabajo, el sistema puede construirse en vertical, horizontal o en ángulo, a pesar de que el temple en vertical es el diseño más común por una serie de razones, entre las que se incluye la reducción de huella y el flujo natural del líquido de temple por mediación de la gravedad.

La principal ventaja del temple mediante barrido radica en que únicamente se templa por unidad de tiempo una parte pequeña de la longitud del componente objeto de tratamiento, permitiendo el temple de piezas largas utilizando generadores de potencia relativamente pequeños y generalmente más económicos. Los sistemas de barrido convencionales permiten variar la velocidad y la potencia durante el proceso, lo que controla la cantidad de calor aplicado a las diferentes áreas de la pieza. Los sistemas de inducción mediante barrido se componen de diferentes elementos variables como son el diseño del inductor, las condiciones de temple o el generador de potencia, cuyo impacto en los resultados del endurecimiento conseguido es muy significativo.

Las irregularidades geométricas y las discontinuidades (que, por otra parte, son típicas de la gran mayoría de los componentes modernos) pueden distorsionar el campo magnético generado en la bobina, causando potencialmente fenómenos indeseables asociados al alcance de altas temperaturas o a gradientes térmicos.

El sobrecalentamiento es una de las causas más comunes de agrietamiento. Las temperaturas extremas provocan la licuación en juntas de grano (fusión incipiente), asociada a la licuación de las fases de bajo punto de fusión, y las impurezas del acero concentradas en las juntas pueden provocar la degradación de las mismas. El debilitamiento de la estructura granular aumenta significativamente la fragilidad del acero, el desarrollo de grietas intergranulares, afectando así negativamente a los resultados metalúrgicos de la inducción. [2].

El fenómeno de la licuación en juntas de grano puede verse amplificado por la segregación de manganeso, azufre, cobre y otros elementos en las juntas de grano austenítico. Tanto el fósforo como el azufre son muy sensibles a las temperaturas de sobrecalentamiento del acero, aumentando la tendencia a la iniciación de grietas.

Como ejemplo, la Figura 3 (izquierda) muestra microestructuras de acero con licuación en juntas de grano. Se ve claramente una red (cadena) de áreas licuadas localizadas en las juntas de grano. Comparativamente, la imagen de la Figura 3 (derecha) muestra una estructura de las denominadas "limpias".

Diferentes magnitudes de sobrecalentamiento comportan varios grados de licuación en juntas de grano y se designan comúnmente como ligero, moderado o severo. Esta asignación es subjetiva y puede ser distinta según diferentes normas o estándares.

Ciertas características geométricas pueden hacer que los componentes sean proclives a localizar sobrecalentamientos durante la austenización, que pudieran provocar la iniciación de grietas durante la subsiguiente ducha de temple. Son típicos ejemplos de tales irregularidades geométricas y discontinuidades los agujeros longitudinales o transversales, los chaveteros, las bridas, las lengüetas, los filos y los bordes esquinados.

Sin embargo, tales características no son extrañas, ya que se encuentran frecuentemente en muchos componentes de motores y transmisiones. [1,2]. Por consiguiente, pudiera ser inevitable el tener un cierto grado de fusión incipiente en las juntas de grano, cuando se utiliza la inducción en geometrías complejas. En casos así, algunos estándares corporativos pueden llegar a permitir una ligera cantidad de licuación en las juntas de grano. La presencia de tensiones residuales compresivas de magnitud apreciable que, por otra parte, es habitual en aplicaciones de tratamiento térmico superficial por inducción, suele ser suficiente a la hora de prevenir la formación de pequeñas cantidades de licuación en juntas de grano. La licuación severa debe evitarse, porque se asocia a una fragilidad extrema, sensibilidad a la entalla y baja tenacidad, lo que significa la fractura por agrietamiento intergranular. (Figura 4).

Factor de Selección inadecuada de Equipo/o Parámetros de Proceso

Otro ejemplo del impacto de irregularidades geométricas comunes en los resultados de tratamiento térmico sería el temple de ejes con múltiples cambios de diámetro, zonas afiladas, así como la combinación de secciones huecas y macizas, y espesores variables. El usuario puede necesitar diferentes penetraciones de las durezas a lo largo de la longitud de la pieza para componentes multifuncionales de geometría compleja.

Todas estas características geométricas son muy habituales y pueden producir desviaciones indeseables en los patrones de dureza, estructuras metalúrgicas, magnitudes y distribución de tensiones, que pueden desarrollar desafortunadamente las condiciones más favorables para la licuación en juntas de grano y desarrollo de grietas. Por tanto, es imperativo disponer no solo del

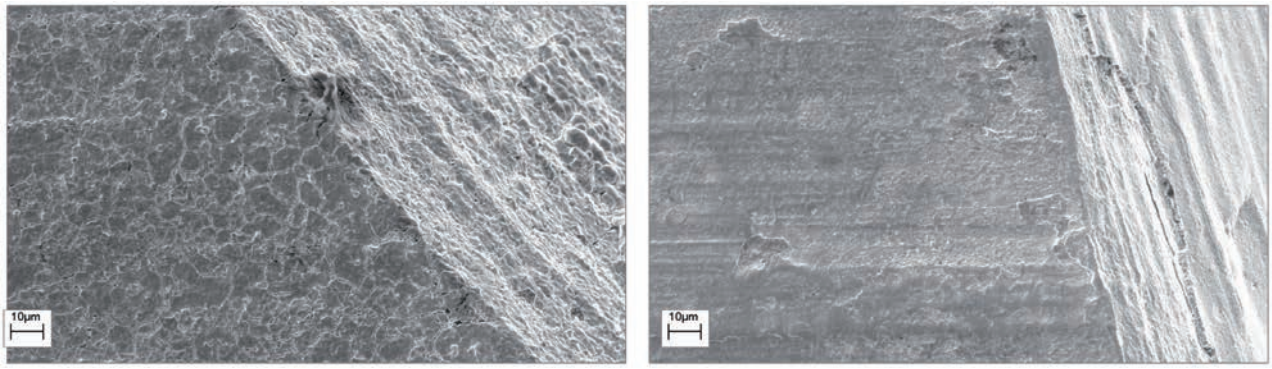


Figura 3: Comparación de dos imágenes SEM (microscopio electrónico de barrido) de estructuras templadas. La imagen izquierda muestra juntas de grano moderadamente licuadas en un acero; mientras que la de la derecha muestra una estructura de las denominadas "limpias" [2].

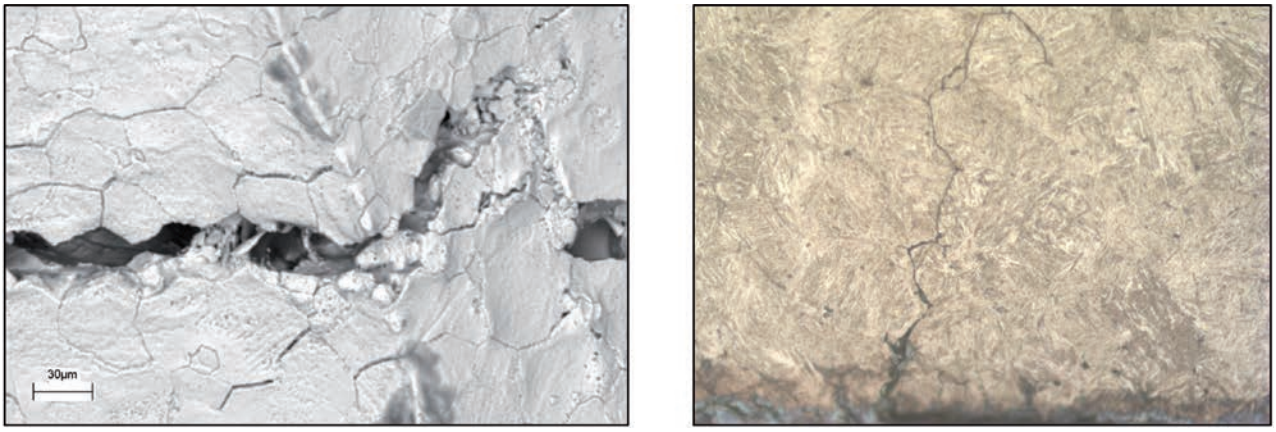


Figura 4: Se debe evitar la licuación en juntas fuerte porque ésta se ve asociada a una extremada fragilidad y a sensibilidad a la entalla, ocasionando agrietamiento intergranular.

control de la intensidad de calor, sino también de su penetración durante el barrido, para la gran mayoría de las aplicaciones modernas de inducción.

La distribución de temperatura a través del radio/espesor es función, en primer lugar, de la frecuencia aplicada, de la densidad de potencia y del cociente tiempo de calentamiento/velocidad de barrido. La frecuencia es el factor más crítico en cuanto a la penetración del calor generado en inducción, porque la frecuencia determina la profundidad de la penetración de las corrientes de Foucault. Además, la frecuencia tiene un potente impacto sobre la reducción de sobrecalentamientos cuando consideramos los casos de mayores irregularidades geométricas y de discontinuidades.

En la mayoría de las ocasiones, simplemente no existe una frecuencia óptima que procese todas las características geométricas y requerimientos de penetración para los componentes modernos. Por ello, los equipos de barrido que aplican una frecuencia fija deben asumir siempre una solución de compromiso entre alcanzar la calidad metalúrgica deseada, la capacidad del proceso, la productividad, la distribución y magnitud de tensiones residuales y transitorias, así como el desarrollo de estructuras libres de grietas y de excesiva distorsión.

Además, la competitividad global exige que los tratamentistas sean extremadamente flexibles. Los clientes a largo plazo pueden cambiar su producción al instante, y los tratamentistas deben ser flexibles para adaptarse a las demandas del mercado [1]. Por ejemplo, hoy se puede necesitar templar superficialmente diámetros de pieza de 12 mm (~0.5 in.) con penetraciones de 1.6 mm (0.0625 in.). Esto requeriría normalmente una frecuencia en el rango de 50-60 kHz. Mañana el producto puede cambiar y necesitarse un eje de 30 mm (1.2 in.) de diámetro con penetración de 5 mm (0.2 in.), lo que implica frecuencias en el rango de 5 a 7 kHz, que garanticen la penetración de la generación de calor. Sin embargo, al día siguiente, podemos necesitar templar piezas de diámetros de 8 mm y 25 mm.

Este ejemplo enfatiza la importancia en los modernos sistemas de temple por inducción, consistente en ser capaces de controlar eficazmente, no solo la densidad de potencia durante el barrido, sino también la penetración de la generación de calor. Desafortunadamente, la mayoría de los generadores disponibles comercialmente para medias y altas frecuencias están diseñados para trabajar a frecuencia única, y no pueden cambiarla instantánea y deliberadamente (a efectos prácticos) en un grado apreciable durante el barrido [1].

Los inversores de nueva generación (Statipower® IFP™) desarrollados por Inductoheat eliminan este inconveniente y simplifican la consecución del patrón de durezas sin comprometer la calidad metalúrgica [1-3]. Esta tecnología innovadora permite, de forma instantánea, los ajustes independientes de potencia y frecuencia (5-60 kHz) de forma preprogramada, durante el ciclo de calentamiento, optimizando las condiciones electromagnéticas, térmicas y metalúrgicas de los productos, ofreciéndose así numerosos beneficios (Figura 5).

La tecnología IFP (Independent Frequency and Power control) responde con efectividad a las necesidades industriales de eficiencia en costes y a una flexibilidad de proceso superior, aumentando enormemente las capacidades de los equipos de inducción, simplificando el desarrollo del proceso e incrementando las calidades metalúrgicas.

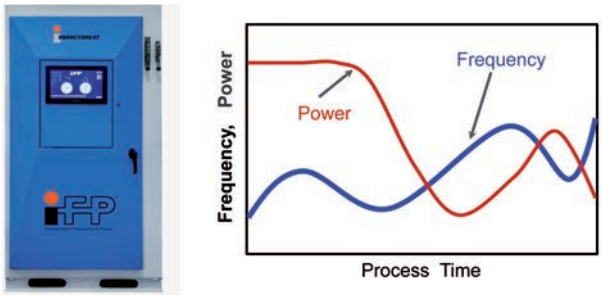


Figura 5: Los inversores de nueva generación (Statipower-IFP) desarrollados por Inductoheat, permiten el ajuste instantáneo e independiente de la potencia y de la frecuencia (5-60 kHz) de un modo preprogramado durante el ciclo de calentamiento, optimizando las condiciones electromagnéticas, térmicas y metalúrgicas, así como aumentando las capacidades del equipo de inducción.

Por consiguiente, si una compañía de automoción contacta con un proveedor y, al día siguiente, otra compañía con un producto totalmente diferente solicita una oferta, el proveedor de componentes debería poder tratar las dos piezas utilizando el mismo equipo disponible en sus talleres.

En el tratamiento térmico por inducción, la bobina se hace a medida para cada geometría de pieza en particular, sin embargo, su coste es relativamente pequeño en comparación con el valor del equipo completo, y concretamente, con el equipo inversor. Así, si el generador puede proporcionar una mayor flexibilidad, esto constituirá un gran ahorro de costes en nuestro mundo que sabemos que es altamente competitivo. El número de proyectos que se pueden abordar con la tecnología patentada por Inductoheat, se irá viendo ampliado a medida que la compañía introduzca nuevos modelos que aumenten los diferentes rangos de frecuencias y potencias máximas disponibles.

Tensiones, su aparición e impacto en la iniciación de grietas y en su propagación

Las tensiones son la causa principal de las grietas. Es primordial tener una clara comprensión de la naturaleza y causas de las mismas a la hora de discutir el fenómeno del agrietamiento en tratamiento térmico.

Podemos clasificar las tensiones de diferentes maneras. Dependiendo de la distancia sobre la que se extienden, las tensiones pueden ser "macroscópicas" o "microscópicas". Las tensiones macroscópicas aparecen típicamente a distancias que comprenden varios granos. Por el contrario, las tensiones microscópicas tienen lugar dentro de un único grano e incluyen tensiones que aparecen a nivel atómico. Los estudios de tensiones residuales en tratamiento térmico de aceros se centran en la distribución y magnitud de las tensiones macroscópicas [1,4].

Respecto a su causa en temple por inducción tenemos diferentes tipos de tensiones, entre las que se encuentran las tensiones térmicas, las tensiones de transformación de fase y las tensiones aplicadas. Las tensiones térmicas vienen causadas por diferentes magnitudes de temperatura, gradientes térmicos, así como contracciones/expansiones desiguales.

Las tensiones de transformación de fases tienen lugar por los cambios volumétricos asociados a la formación de diferentes fases, tales como la austenita, bainita, martensita… y otras.

Las tensiones aplicadas durante el temple por inducción se asocian a los utillajes de sujeción de los componentes tratados durante el calentamiento y el temple. Por ejemplo, las piezas cilíndricas (como los ejes tratados superficialmente) experimentan tensiones compresivas y de torsión durante su rotación en los sistemas de disparo único o en los sistemas de barrido.

En aplicaciones de endurecimiento másico, una pieza firmemente sujeta por los extremos o centros, intentará expandirse durante el ciclo de calentamiento, provocando potencialmente tensiones aplicadas y creando las condiciones favorables para una distorsión excesiva (debido al pandeo) y potencial agrietamiento. La utilización de un muelle de baja presión en uno de los apoyos del utillaje, de manera que absorba el crecimiento de la pieza, puede ayudar a reducir estas tensiones y solucionar el problema.

Pese a que las tensiones son tridimensionales (3D) en su naturaleza, con componentes axiales, circunferenciales (aros) y radiales, su estudio se simplifica considerándolas tensiones unidimensionales (tensión de magnitud máxima).

Sobre la base del orden en su aparición, podemos clasificar las tensiones en tres grupos: tensiones iniciales, tensiones transitorias y tensiones residuales.

Tensiones Iniciales. Las tensiones iniciales se hallan "ocultas" en la pieza "virgen". Su distribución y su magnitud dependen de las etapas de fabricación previas al temple por inducción (fundición, forja, soldadura, laminación… etc.). Por ejemplo, en los componentes forjados en caliente, la mayoría de las tensiones se localizan comúnmente en el núcleo. Durante el calentamiento, las tensiones iniciales de magnitud apre-

ciable se pueden combinar con tensiones transitorias y desarrollar el inicio de una grieta, ocasionando agrietamiento subsuperficial. De este modo, en caso de duda, debería realizarse un alivio de tensiones de la pieza, previo al temple por inducción.

Tensiones transitorias. Adicionalmente a las tensiones iniciales, existen las tensiones transitorias, que aparecen durante el temple por inducción, como consecuencia de las expansiones y contracciones asociadas a las temperaturas, gradientes térmicos y transformaciones de fase. Nuestra experiencia muestra que durante el temple por inducción, las tensiones transitorias son las responsables de la mayoría de los agrietamientos.

Tensiones Residuales. Estas tensiones permanecen en la pieza una vez concluido el proceso de temple por inducción. Por tanto, las tensiones residuales son el producto de las tensiones iniciales y de las transitorias, y existen en ausencia de fuerzas externas o gradientes térmicos. En muchos casos, estas tensiones pueden ser beneficiosas, complementando los cambios necesarios de microestructura para alcanzar las características de ingeniería buscadas. En otros casos, las magnitudes y la distribución de las tensiones residuales pueden ser dañinas, aumentando la sensibilidad al agrietamiento, facilitando la iniciación y propagación de grietas, ocasionando agrietamientos retardados y acortando la vida del componente en servicio.

Estas tensiones pueden elevar o reducir la tensión media durante la vida en servicio de la pieza. Las tensiones residuales superficiales de compresión son deseables en la mayoría de las aplicaciones. Entre otros factores, estas tensiones son importantes para mejorar las propiedades de fatiga de la pieza, retrasando la iniciación de grietas y la propagación de micro-grietas, así como proporcionando una protección deseable contra los generadores geométricos de tensiones (por ejemplo, las entallas, las hendiduras…) y las heterogeneidades microestructurales. Las tensiones residuales de compresión son particularmente beneficiosas en piezas que experimentan doblados, impacto y/o torsiones durante su servicio. Aumentan la resistencia a la fatiga dado que las tensiones aplicadas en servicio son opuestas y la presencia de tensiones superficiales ayuda a minimizar la magnitud de la suma de ambas, decreciendo la tensión media.

Es importante recordar que el sistema de tensiones residuales es autoequilibrante; es decir, hay siempre un equilibrio de tensiones en la pieza perteneciente al equilibrio estático. Si hay ciertas regiones con tensiones residuales compresivas, entonces en otro lugar tiene que haber tensiones expansivas. Y si las tensiones no estuvieran equilibradas, lo que habría es "movimiento", lo cual es malo.

Las tensiones residuales expansivas de cierta magnitud y localización pueden ser peligrosas, con impacto negativo en la resistencia a la fatiga y pueden también originar agrietamiento por tensión-corrosión en entornos corrosivos. Estas tensiones se combinan con las tensiones de carga durante el servicio, amplificando la magnitud de las tensiones totales, lo que podría exceder la resistencia del material, ocasionando el desarrollo de grietas.

En aplicaciones donde solo se necesita endurecimiento superficial, el máximo de las tensiones residuales expansiva está localizado justo debajo de la parte endurecida, en la zona de transición, y es el responsable, a menudo, de la iniciación de grietas subsuperficiales.

La mayor magnitud de las tensiones residuales expansivas en componentes templados superficialmente, se asocia normalmente con un incremento en la fragilidad y en la sensibilidad a entalla, reducción de la tenacidad y de la resistencia a la fatiga. Esta es una de las razones por la que se puede aplicar un revenido aliviador de tensiones después del temple por inducción, que ayuda a reducir el pico de tensiones residuales expansivas y las desplaza más lejos de las regiones en las que se aplican las tensiones de servicio, manteniéndose así las beneficiosas tensiones superficiales compresivas.

Por el contrario, en aplicaciones de endurecimiento másico, las tensiones residuales superficiales son mayoritariamente expansivas, pero bajo determinadas condiciones de temple, estas se pueden convertir en compresivas.

Una herramienta esencial que ayuda a acometer la complejidad en la distribución de las tensiones residuales y transitorias es la modelización matemática, teniendo en cuenta la complejidad de la cinética de las transformaciones de desplazamiento y reconstrucción, basadas en enfoques termodinámicos y fenomenológicos, que se discuten en muchas publicaciones. Algunos de los estudios más profundos en modelización computerizada de tensiones para calentamiento por inducción son los realizados por científicos de compañías tales como DANTE Solutions, Inc.

Diagrama de Bloques para Agrietamiento en Temple por Inducción

Prácticamente la infinidad de componentes templados habitualmente por inducción requieren otra infinidad

correspondiente de recetas y de diseños de inductores. Cada componente tiene su propia "personalidad" que afecta a las características del tratamiento térmico, incluyendo la propensión al agrietamiento. La Figura 6 muestra un diagrama de bloques sobre el agrietamiento y su prevención en lo que respecta al temple por inducción, mostrándose la complejidad de un asunto tan amplio como es éste [2,5].

Esperemos que los lectores de este artículo nunca experimenten el problema del agrietamiento, pero si esto llega a ocurrir, este diagrama puede ser útil ya que uno o varios de los factores reflejados en el diagrama pueden ser los causantes de la iniciación de las grietas.

Como se puede concluir del diagrama de bloques, las causas potenciales del agrietamiento se pueden categorizar en siete grupos principales:

- Relativos al material.
- Geometría de la pieza.
- Ciclo Potencia/energía (durante el calentamiento) y condiciones de calentamiento no especificadas.
- Condiciones de temple inadecuadas (incluyendo potencia del enfriamiento y uniformidad).
- Diseño de inductor incorrecto.
- Accesorios no adecuados, utillaje y fijaciones.
- Otros factores.

Incluso un vistazo superficial a la Figura 6 nos muestra la complejidad y los cambios observados a la hora de determinar la raíz y los factores asociados al agrietamiento. Si hay grietas, puede haber un número de factores interrelacionados responsables de su aparición. La conciencia del amplio espectro de factores asociados con los diversos tipos de fallos, es un paso importante para el desarrollo de procesos libres de grietas. Como mínimo, un analista debe tener conocimientos sobre análisis de fallos, electromagnetismo, metalurgia, ciencia de materiales, mecánica, transferencia de calor, química, espectroscopía… y otras disciplinas. Además, hay que tener el suficiente grado de conocimiento del equipo de temple y de las peculiaridades del proceso para cada máquina utilizada bajo la investigación.

Las grietas infrecuentes son las más difíciles de caracterizar y eliminar, ya que su aparición a veces, puede ser considerada como un fenómeno estadístico y su raíz se ve a menudo asociada a etapas previas de la cadena de producción. Cada etapa previa de fabricación supone

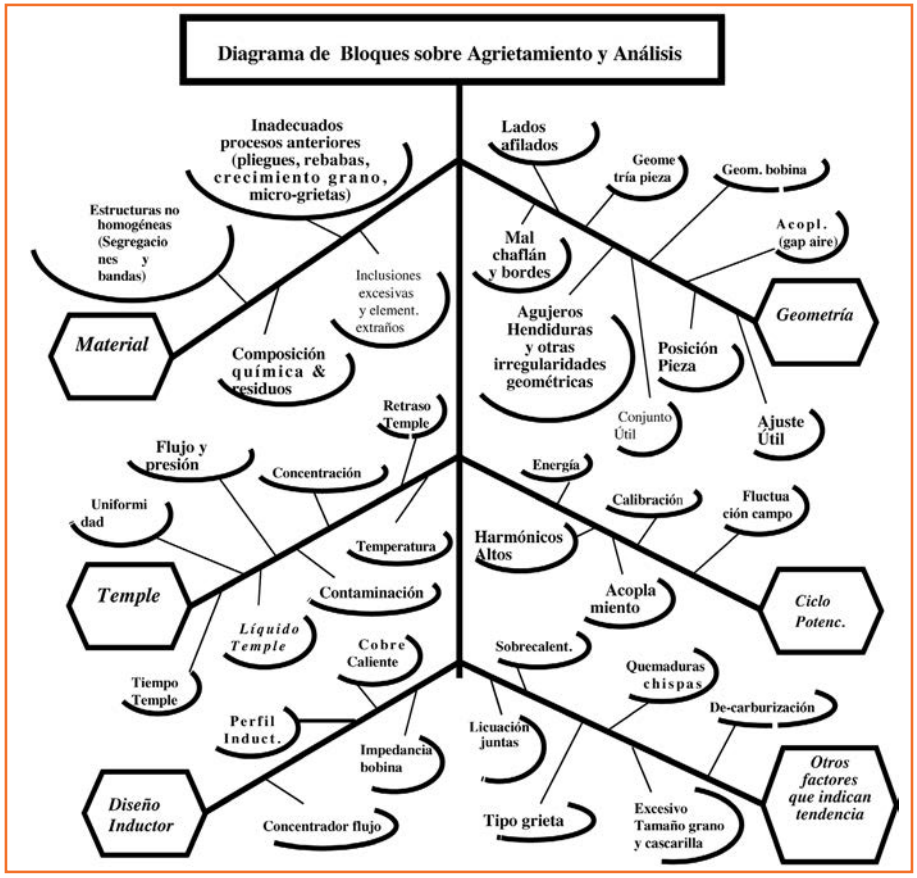


Figura 6: Diagrama de bloques sobre agrietamiento y prevención del mismo en temple por inducción, mostrando la complejidad del asunto y su naturaleza interconectada" [2,5].

un potencial origen para ciertos problemas de los que se suele acusar después al temple por inducción.

De todos modos, es mucho más fácil determinar la raíz de la causa de una grieta si la iniciación se puede "encender" o "apagar", modificando los parámetros de proceso.

Si por alguna razón, el acero no responde al tratamiento al tratamiento de la manera esperada, desarrollando grietas, en ese caso uno de los primeros pasos para determinar la raíz de la causa para el comportamiento inesperado, es asegurarse de que el acero tiene la composición química, homogeneidad y microestructura previa adecuadas, así como el historial térmico apropiado. En algunos casos, lo que se supone que debería ser un mismo grado de acero, comprado a diferentes proveedores, puede tener variaciones apreciables de composición y propiedades.

En las necesidades del mundo real, los fabricantes de equipos de temple por inducción deberían tener la experiencia y capacidad de análisis suficientes para ayudar a los tratamentistas con sus problemas específicos.

Cualquier lector interesado puede encontrar numerosas publicaciones y consejos, compartidos por expertos industriales para evitar el agrietamiento de las piezas. Algunas de las recomendaciones y remedios sencillos con objeto de eliminar o minimizar la probabilidad de agrietamiento se tratarán y explicarán en la segunda parte de este artículo.

"Este artículo apareció originariamente en Septiembre 2019 en la Thermal Processing magazine (USA). Publicado con su permiso".

Referencias

1. G.Doyon, V.Rudnev, C.Russell, J.Maher, Revolution –not an evolution– necessary to advance induction heat treating, Advance Materials & Processes, September, 2017, pp. 72-80.
2. V.Rudnev, D.Loveless, R.Cook, Handbook of Induction Heating, CRC Press, 2017.
3. www.inductoheat.com
4. ASM Handbook Volume 11: Failure Analysis and Prevention, ASM International, 1998.
5. V.Rudnev, Troubleshooting cracking in induction hardening, Heat Treating Progress, ASM Intl., August, 2003, pp.27-28.

HORNOS PARA TRATAMIENTOS TÉRMICOS AL VACÍO

- Temple Gas
- Temple Aceite
- Revenido
- Recocido
- Soldadura Brazing
- Sinterizado
- MIM
- Nitruración Baja Presión
- Nitruración Iónica
- Cementación Baja Presión

EL ESPECIALISTA EN HORNOS DE VACÍO DESDE HACE MÁS DE 70 AÑOS

APLICACIONES TERMOTECNICAS, S.L
Polígono Erletxe, Plataforma B, Nave 5 - 48960 GALDACANO - ESPAÑA
Telf. (+34) 944 262 522 - Fax. (+34) 944 262 262
info@aplitec-tt.com - www.aplitec-tt.com - www.bmi-fours.com

INGENIERÍA DE REFRACTARIOS Y COMBUSTIÓN

Compromiso y fiabilidad

DEGUISA

www.deguisa.com

TECRESA®
TECNICAS DE REFRACTARIOS, S.A.U.
A member of the STEULER Group

EMPRESA LIDER EN MONTAJE, SUMINISTRO, MANTENIMIENTO Y SUPERVISION DE REVESTIMIENTOS REFRACTARIOS
Revestimientos Refractarios Industriales
Pavimentos Industriales – Protección de Superficies
Reparación y Refuerzo Estructural – Protección Pasiva contra Incendios
Ingeniería de Revestimientos Refractarios - Estudios de Eficiencia Energética

CENTRAL
Ribera de Zorrozaurre 15, 2º
Tf: +34 902 11 89 47·Fax: +34 944 48 37 32
48014 BILBAO
www.tecresa.com · tecresa@tecresa.com

DELEGACIONES
Asturias
Andalucía
Galicia
Cantabria

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, 76
08030 Barcelona

Tel.: 93 223 26 62
Fax: 93 223 26 67
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

CODERE SA
Fabricante de hornos industriales para el tratamiento térmico

Utillaje forming

ECONOX SA
- Sonda de oxígeno.
- Regulador de atmósfera.
- Supervisión de taller.

RD TECHNOLOGIES

APLICACIONES TERMOTECNICAS, S.L Apdo. 4052 - 48080 BILBAO - ESPANA
Tel: +34. 94.426.25.22 Fax:+34. 94.426.22.62 info@aplitec-tt.com www.aplitec-tt.com

Fabricamos hornos y estufas industriales
Modelos stándars y especiales

tecno piro®
www.tecnopiro.com

Hornos del Vallés, S.A
Barcelona (Spain)

T/ 936 926 612 - 606 134 562
hdv@tecnopiro.com

PROYCOTECME
HORNOS INDUSTRIALES

Especialistas en tratamiento térmico

SOLO Borel Special Furnaces

HORNOS VERTICALES, TRANSFER Y CONTINUOS
HORNOS Y ESTUFAS

PANELES DE GASES
PANELES DE CONTROL Y SUPERVISIÓN
CONSUMIBLES Y CALDERERÍA
CONSUMIBLES FUNDICIÓN

Ipsen

Tel: +34 938 467 984
www.proycotecme.com
proycotecme@proycotecme.com

Interbil
Ingeniería Térmica Bilbao s.l.

Ingeniería y Productos para Hornos y Procesos Térmicos

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

- 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

Su Proveedor de soluciones en Tratamiento de Superficies

Maquinaria y consumibles para granallado, chorreado, shotpeening y acabado por vibración.

Gran Via de les Corts Catalanes 133, At.B, 08014 BARCELONA
Tel. +34 934211266 Fax. +34 934223137

wheelabrator
shaping industry

www.wheelabratorgroup.com • contact@wheelabratorgroup.es
Norican Group es la empresa matriz de DISA y Wheelabrator

alju

- Granalladoras.
- Instalaciones de chorreado manual y automático.
- Líneas de granallado y pintado.
- Filtros de aspiración.
- Piezas y calderería antidesgaste.
- Esmeriladoras pendulares.

FABRICANTES CON INGENIERÍA PROPIA

Teléf.: +34 944 920 111 • e-mail: alju@alju.es • www.alju.es

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.*

CRONITE
Better by design

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

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

ERVIN
The World Standard for Quality

Ervin es el fabricante especialista en granalla de Acero y Granalla de Acero inoxidable.
No sólo ofrecemos la mejor calidad de granalla del mercado, sino también un excelente servicio técnico.

- **Máxima productividad, mínimo coste**
- **Desgaste reducido**
- **Reducción del polvo y de la eliminación de residuos**

Por favor, póngase en contacto con el Sr. Manuel Forn:
M +34 628 531 487 mforn@ervin.eu www.ervin.eu

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

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

SCHMOLZ + BICKENBACH GUSS
GmbH & Co. KG

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

Ipsen
www.Ipsen.de
Your Total Solutions Provider

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

HOT
écnicas 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
Suministro y Calibracion Industrial s.l.
sondas pt-100
servicio técnico
instrumentación
www.sciempresa.com
calibración insitu
calibración TUS
cámara termografica
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

Generación económica para un Vacío óptimo
Busch Ibérica S.A.
+34 (0)93 861 61 60
busch@buschiberica.es
www.buschiberica.es
BUSCH
Bombas y Sistemas de Vacío

AMETEK
MATERIALS ANALYSIS DIVISION
Analizadores Estacionarios de Metales
La solución integral para sus necesidades de análisis de metales
SPECTROLAB
Máximas prestaciones para la siguiente generación de analizadores de metal
SPECTROMAXx
El Analizador de Metales Preferido
SPECTROCHECK
Las máximas prestaciones y fiabilidad al precio más bajo posible
Visitenos en:
MetalMadrid – 27 y 28 de Noviembre – Stand D40
¡Celebramos 40 años!
SPECTRO
40 YEARS
944 710 401 • comercial@spectro.es

INDICE de ANUNCIANTES

3D ADDITIVE EXPO 8
ACEMSA 48
ALJU 48
APLITEC 47
ARROLA . . . . . PORTADA
BAUTERMIC 46
BMI 47
BOREL SWISS 49
BUSCH 49
CRONITE 11
DEGUISA 47
ENTESIS 47
ERVIN 48
FLEXINOX 47
GRUPO PIROVAL 46
HEA . . . . . CONTRAPORTADA
HORNOS DEL VALLÉS 17
HOT 15
INSERTEC 49
INTERBIL 5
IPSEN 49
LIBROS TRATAMIENTOS TÉRMICOS . . . . . 26 y 27
METALMADRID . . . . . Interior PORTADA
NAKAL 23
ONDARLAN 9
PROYCOTECME 47
REVISTAS TÉCNICAS . . . . . Interior CONTRAPORTADA
SOLO SWISS 49
SPECTRO 49
SUMINISTRO Y CALIBRACIÓN 13
TECNYMAT 19
TECRESA 47
WHEELABRATOR 48

Próximo número

DICIEMBRE

Gases especiales. Atmósferas. Fuentes de energía. Dispositivos ópticos. Equipos e instrumentos de control y medición. Hornos de temple, revenido. Lubricantes. Hornos de gas y electricidad. Tratamiento térmico de moldes. Transporte y elevación. Tratamiento de superficies. Hornos de cinta. Medio ambiente.

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 • pedeca@pedeca.es • www.pedeca.es

HORNOS A GAS DE ALTA HOMOGENEIDAD

HEA
SINCE 1945

HORNOS INDUSTRIALES

www.alferieff.com • hea@hornoshea.com
Telféfono: +34 91 639 69 11