

# Tratamiento de materiales a temperaturas criogénicas: evolución y aplicaciones

L. A. Alava (<sup>1</sup>)  
luis.alava@cryobest.com

(<sup>1</sup>) *Cryobest International, S.L. Vitoria (España)*

---

## Abstract

Desarrollados en los últimos años del siglo XX, los tratamientos criogénicos de materiales aún son poco conocidos y apenas utilizados en Europa. Sin embargo, tienen un gran potencial de aplicación ya que aportan mejoras, a veces espectaculares, en determinadas prestaciones entre las que se pueden destacar la resistencia al desgaste y la vida a fatiga.

Estos procesos (que no deben confundirse con los tratamientos subcero) no dejan de ser tratamientos térmicos y, por ello, afectan de modo permanente a todo el volumen del material. Por otra parte, son perfectamente compatibles con los recubrimientos antidesgaste habituales en la industria. Además, los tratamientos criogénicos son totalmente ecológicos ya que, para su realización, no se produce ningún tipo de vertido o residuo.

Este trabajo presenta los fundamentos, desarrollo y evolución de los tratamientos criogénicos, así como los métodos y equipos en los que se realiza. También se exponen sus aplicaciones industriales y algunas líneas probables de desarrollo futuro.

---

## 1. Antecedentes

El acceso a temperaturas criogénicas no fue posible hasta que, a finales del siglo XIX, se descubrió el proceso que permitía conseguir la licuefacción del aire. Esta tecnología aun tuvo que evolucionar hasta que ya se pudieron conseguir cantidades suficientes de gas licuado.

Los primeros ensayos de lo que podríamos llamar tratamientos criogénicos datan de la primera mitad del siglo XX y, al parecer, se realizaron en Alemania y en la extinta Unión Soviética. Poco se sabe de aquellas experiencias que, básicamente, consistían en sumergir acero directamente en nitrógeno líquido y dejarlo hasta alcanzar el equilibrio térmico.

El inicio del desarrollo industrial de este tipo de procesos es mucho más reciente y se produjo en Norteamérica en los años 70 de la mano de la industria aeroespacial. También datan de esa época los trabajos del Dr. Randall Barron [1, 2] de la Luisiana Technical University a los cuales aún se hace referencia frecuentemente hoy en día. Gracias a la mejora de los sistemas de control y a que el nitrógeno líquido ya era bastante asequible aparecieron las primeras empresas que realizaban tratamientos criogénicos y su uso industrial empezó a ser un hecho.

En los años 90 la tecnología comenzó a extenderse por todo el mundo y hoy es posible encontrar instalaciones en los cinco continentes aunque, curiosamente, Europa lleva un gran retraso en la implantación de este tipo de procesos. Cuando el proyecto de Cryobest International S.L. se inició en 2002 sólo había constancia de una empresa (inglesa) que hiciera tratamientos criogénicos en Europa. Aun hoy se pueden contar con los dedos de una mano las empresas que se dedican a realizar este tipo de procesos aunque también empieza ofrecerlos alguna compañía dedicada a los tratamientos térmicos convencionales.

## 2. Definición y tipos de proceso

Las temperaturas criogénicas se definen por la Cryogenic Society of América como aquellas que son inferiores a 120 K (aproximadamente  $-153$  °C). Por lo tanto los tratamientos criogénicos serían aquellos en los que los materiales son sometidos a temperaturas inferiores a la mencionada.

En este punto es preciso hacer una aclaración. A veces, sea inconscientemente o interesadamente, se confunden los tratamientos subcero con tratamientos criogénicos cuando de hecho son algo totalmente distinto. Los tratamientos subcero (shallow cryogenics) se realizan a una temperatura mucho más alta (normalmente en torno a  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Este proceso, que es ofrecido por bastantes empresas convencionales de tratamiento térmico, se realiza normalmente a continuación del temple. El objeto es continuar con la transformación del temple (austenita a martensita) que, en ciertos aceros, no se llega a completar a temperatura ambiente.

Hay muchos tipos de tratamiento que podríamos denominar como criogénicos. Para una mejor comprensión tal vez podrían agruparse en tres tipos: los convencionales (secos), los de inmersión (húmedos) y los múltiples. Prácticamente todos ellos utilizan nitrógeno líquido como agente enfriador (en algún caso complementado con enfriamiento mecánico).

Los procesos criogénicos que hemos denominado como convencionales son los más extendidos. Consisten básicamente en enfriar la cámara muy lentamente hasta llegar a una temperatura que, normalmente, ronda los  $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Esta temperatura se mantiene durante un periodo prolongado de tiempo (típicamente de 24 a 48 horas) y, posteriormente, se vuelve, de nuevo lentamente, hasta la temperatura ambiente. Habitualmente el tratamiento se completa con uno o varios revenidos. Es fácil concluir que, para realizar un proceso de este tipo son necesarios dos, tres e incluso más días.

Los procesos de inmersión son similares a los convencionales salvo en que, cuando se llega a una temperatura suficientemente baja, la cámara se inunda con nitrógeno líquido ( $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y el material a tratar queda sumergido. Este tipo de procesos aumenta el riesgo de choque térmico y tiene peor control del proceso ya que hay que esperar a que el líquido se evapore para volver a la temperatura ambiente lo cual hace que el proceso pueda ser aun más largo, aparte de muy poco eficiente desde el punto de vista del consumo.

Salvando las distancias, este proceso es el que más se parece a los sistemas originales de inmersión directa en nitrógeno líquido. Actualmente es defendido por un fabricante canadiense de procesadores y en la práctica se utiliza bastante menos que el proceso seco.

Los procesos “múltiples” son los más avanzados. Se desarrollaron por primera vez a finales de los 90 por una empresa de Florida. A diferencia de los tratamientos criogénicos convencionales, que son isotermos, someten a los materiales a varias etapas o ciclos controlados de temperatura criogénica. Los gradientes térmicos son mayores y el tiempo total de ciclo se reduce notablemente. Los resultados son, generalmente, mejores.



Fig. 1 - Procesador criogénico multietapa Cryobest®

El proceso criogénico multietapa o proceso Cryobest® pertenece a este último tipo. Los sucesivos enfriamientos y calentamientos a los que se somete al material inducen un efecto mecánico de contracción expansión que se superpone al mero efecto térmico haciendo que el tratamiento sea más efectivo. El tiempo total de un ciclo de tratamiento de este tipo puede ser de tan solo 12 horas, pudiendo ser mayor en

función de los espesores de los materiales a tratar (aunque raramente es de más de un día). Normalmente no se realiza revenido después del proceso.

Este tipo de procesos criogénicos múltiples aún es poco conocido, pero tiene todos los ingredientes para ser el más utilizado en el futuro, especialmente para grandes volúmenes de producción, debido a su mejor productividad y mayor eficiencia (menor consumo de nitrógeno líquido).

### **3. Efectos y materiales**

La lista de materiales a los que se pueden aplicar los tratamientos criogénicos es muy extensa y sigue ampliándose a medida que se ensayan nuevas aplicaciones. Entre los que responden positivamente al tratamiento se encuentran:

- aceros: de cementación, microaleados, de trabajo en frío y en caliente, rápidos, inoxidable, etc.
- fundición
- aleaciones de cobre
- aleaciones de aluminio
- metal duro
- materiales cerámicos
- ciertos polímeros (nylon, teflón...)

Los tratamientos criogénicos pueden tener efectos diversos en los materiales y entre los más habituales están los siguientes:

- mejora de la resistencia al desgaste
- aumento de la vida a fatiga
- eliminación de tensiones
- estabilidad dimensional
- mejora de la conductividad
- mayor resistencia a la corrosión

La respuesta al proceso dependerá del material y, lógicamente, en función de la aplicación considerada tendrán más o menos importancia unos u otros de los efectos arriba mencionados.

En algunos casos los tratamientos criogénicos podrían considerarse como una extensión de los ciclos convencionales de temple. Sin embargo, también pueden tratarse materiales que no han sido templados. En cualquier caso hay que destacar que, aunque a veces puedan producirse ligeros aumentos de la dureza, los tratamientos criogénicos no la alteran de modo significativo.

Hay que tener presente que, a pesar de las temperaturas a las que se efectúan, los procesos criogénicos son tratamientos térmicos y, como tales, afectan de modo permanente a todo el volumen del material. Es decir, no son tratamientos superficiales. Por tanto el proceso se aplica una sola vez y si se somete, por ejemplo, a un punzón ó una cuchilla a un tratamiento de este tipo, podrá ser afilado o modificado cuantas veces se desee sin que se produzca una pérdida de prestaciones.

Otra característica interesante de este tipo de tratamientos es que son perfectamente compatibles con los recubrimientos antidesgaste (PVD, CVD, etc.) habituales en la industria y que la combinación de este tipo de procesos puede mejorar aún más los resultados.

Por último hay que destacar que, desde un punto de vista medioambiental, los procesos criogénicos son totalmente ecológicos. Para la realización de un tratamiento criogénico multietapa sólo se utiliza nitrógeno líquido (que se extrae de la atmósfera y, tras el proceso, vuelve a ella) y se consume muy poca energía eléctrica.

### **4. Teorías relativas a los tratamientos criogénicos**

En primer lugar es necesario aclarar que los tratamientos criogénicos se han desarrollado prácticamente de forma empírica, a lo largo de innumerables experiencias de laboratorio y de campo.

Durante los últimos años se han llevado a cabo en todo el mundo numerosos estudios que han analizado la respuesta de diversos tipos de materiales a las temperaturas criogénicas y las diferencias entre distintas variantes de proceso.

La primera explicación que se dio a las a menudo sorprendentes mejoras en las prestaciones de ciertos materiales considera que los tratamientos criogénicos son una mera prolongación de los procesos de temple. Cuando se temple un acero, a medida que se baja la temperatura, la austenita se va transformando en martensita, una fase del acero más dura y resistente. La bajada de temperatura habitualmente se detiene al llegar a temperatura ambiente. Sin embargo hay materiales cuyo límite de transformación está por debajo de dicha temperatura ambiente (por ejemplo algunos aceros de trabajo en frío) con lo cuál queda en ellos una parte importante de austenita sin transformar. En estos casos el tratamiento criogénico permitiría continuar con la transformación y disminuir el porcentaje de austenita retenida, transformándola en martensita.

Por otra parte, la austenita retenida no es totalmente estable y, con el tiempo, tiende a transformarse en martensita. Dado que el cristal de martensita es ligeramente más grande que el de austenita, esto puede llegar a provocar tensiones y deformaciones en los aceros que tienen este tipo de estructuras.

Si esta fuera la única explicación de los tratamientos criogénicos, bastaría con realizar un simple tratamiento subcero para conseguir los mismos resultados. Sin embargo, aunque los tratamientos subcero pueden producir ciertos efectos en algunos casos, éstos distan mucho de los que se consiguen con un tratamiento criogénico.

Fruto de las investigaciones realizadas en este campo se ha podido constatar que, a temperaturas criogénicas, se produce en los aceros una precipitación de  $\eta$ -carburos. Estos, finamente dispersos por la estructura cristalina del acero, la hacen más resistente [3, 4]

A pesar de que la transformación austenita-martensita y la precipitación de carburos son hechos ciertos y se mencionan con frecuencia como la justificación de los efectos de los tratamientos criogénicos [5], no constituyen una explicación suficientemente convincente. Estos fenómenos sólo se producen en los aceros (y no en todos) y, como se ha mencionado, hay una amplia variedad de materiales cuya respuesta a las bajas temperaturas no puede en absoluto explicarse de este modo.

Por ello se han realizado numerosas investigaciones que han tratado de encontrar la clave del funcionamiento de los tratamientos criogénicos pero, hasta la fecha, no se ha llegado a nada concluyente. Las teorías que parecen más plausibles apuntan a la eliminación de tensiones y pequeños defectos a nivel microcristalino lo cuál proporcionaría estructuras más homogéneas y continuas. En cualquier caso, sigue habiendo mucho que investigar y, dado el gran número de materiales que responden al tratamiento, hay un largo trabajo por delante. No hay duda de que los tratamientos criogénicos afectan al comportamiento de los materiales pero no aún no está suficientemente claro el por qué.

## **5. Aplicaciones de los tratamientos criogénicos**

Cuestiones como el desgaste o la fatiga tienen unas consecuencias económicas y medioambientales incalculables en nuestra civilización. No es extraño, por tanto, el estudio de estos fenómenos y la búsqueda de soluciones que los minimicen hayan sido constantes a lo largo de la historia.

La necesidad de mejorar el rendimiento de los materiales siempre está presente. Consecuentemente, es fácil entender que las aplicaciones de los tratamientos criogénicos son innumerables y que están en continuo desarrollo. Las hay en prácticamente todos los sectores: metalmecánico, estampación, fundición e inyección, siderurgia, automoción, aeronáutico y aeroespacial, obras públicas, minería, forestal, agricultura, industria química, papelería, eléctrico, material quirúrgico y ortopédico, material deportivo, competición de motor, etc.

Entre los materiales que se pueden tratar criogénicamente se pueden encontrar herramientas y componentes de todo tipo: cuchillas, brocas, fresas, cortadores, brochas, sierras, insertos, punzones, matrices, electrodos, moldes, rodets, muelles, engranajes, rodamientos, motores, transmisiones, cables, conectores... Obviamente en cada caso el efecto buscado es distinto (resistencia al desgaste en las cuchillas, vida a fatiga en las transmisiones, conductividad en los cables, etc.)

La vida en servicio de un componente depende de muchos factores y la aplicación de un tratamiento criogénico es sólo uno más de ellos. Si, por ejemplo, se toma el caso de una herramienta de corte (por

ejemplo una broca), en su rendimiento influirán en mayor o menor medida factores como la geometría, el material en el que se ha fabricado, sus tratamientos térmicos, el recubrimiento (si lo hay), el material a taladrar, el lubricante o refrigerante empleado, los parámetros de proceso (velocidad de corte, avance...), la máquina e, incluso, el operario. Una operación de taladrado es la suma de todos estos factores y una variación en cualquiera de ellos puede alterar notablemente el rendimiento de la herramienta.

El tratamiento criogénico no es más que un factor más. Con esto se quiere indicar que en ningún caso puede considerarse como una panacea y que su resultado dependerá de cada caso concreto. Por eso no es raro que se presenten aplicaciones aparentemente similares en las que no se obtenga el mismo resultado. Incluso el tratamiento de una misma herramienta podrá proporcionar resultados completamente distintos en función de la aplicación.

No obstante, desde la experiencia de Cryobest International, S.L., duplicar la vida es un resultado que se puede considerar como bastante normal. Se han encontrado casos en los que se ha llegado incluso a multiplicar por seis la vida de una herramienta.

## 6. Ejemplos de aplicación.

Para ilustrar mejor las posibilidades de los tratamientos criogénicos a continuación se exponen algunos casos reales. En todos ellos los tratamientos se realizan en Cryobest International, S.L. utilizando el sistema multietapa.

Un caso muy ilustrativo es el de la fabricación de direcciones para camiones. La operación concreta es el tallado de la cremallera para lo cuál se utilizan peines cortadores tipo Maag. Estos peines se fabrican con un acero rápido pulvimetalúrgico (ASP 2030 de Erasteel) y se recubren con TiN, cuando son nuevos y cada vez que son afilados.

Tras la aplicación del tratamiento criogénico multietapa a los peines, estos han pasado a fabricar una media de 160 cremalleras entre afilados, frente a las 60 de media que podían fabricar sin el tratamiento. No sólo eso: mientras que anteriormente se retiraban de 0,3 a 0,4 mm. de material en cada afilado ahora sólo hay que retirar de 0,2 a 0,3 mm. debido a que el desgaste es más uniforme.

El tratamiento criogénico sólo se aplica una única vez en cada peine y en este caso ha permitido multiplicar por más de tres la vida de la herramienta y, consecuentemente, reducir la frecuencia de recubrimientos y afilados. Además, también se reducen los cambios de herramienta que tienen un peso importante en la fiabilidad y el coste del proceso. En este ejemplo, que corresponde a la planta que TRW tiene en Pamplona, la incidencia del coste de la herramienta en cada pieza fabricada se ha reducido a menos de un tercio de la que tenía antes de utilizar el proceso.



Fig. 2 - Peines Maag dispuestos en la cámara para su tratamiento.

Los procesos criogénicos también pueden aumentar la vida de servicio de los muelles. En una empresa que inyecta plástico se utilizan gran cantidad de pequeños muelles para accionar una parte móvil de ciertos moldes de alta producción. Con el uso, estos muelles van perdiendo prestaciones hasta que, en torno a 1.000.000 ciclos, quedan inservibles (en la práctica se cambian tras 800.000 inyectadas ya que a partir de ese punto aumenta el riesgo de aparición de roturas).

Desde que estos muelles se someten al proceso criogénico multietapa mantienen su capacidad, sin roturas, hasta 2.000.000 de ciclos aunque se ha decidido cambiarlos cada 1.600.000 para contar con un margen de seguridad.

Las aleaciones de cobre mejoran su rendimiento con el tratamiento criogénico. Una empresa fabricante de componentes de automoción realiza procesos de soldadura por resistencia. Para ello utiliza electrodos de cobre Mallory 100 (CuCoBe) con geometrías diversas. Tras someterlos al tratamiento, prácticamente todos ellos mejoran en mayor o menor medida su rendimiento. En el caso más espectacular se pasó de reparar el electrodo cada 2 horas (unas 300 piezas) a hacerlo cada 12 horas (unas 1.800 piezas).

También el metal duro responde bien a este proceso y de ello dan fe numerosas experiencias. Una empresa francesa del sector aeronáutico taladra titanio con brocas de metal duro de Ø7,9. Con el tratamiento criogénico multietapa prácticamente se ha multiplicado por cuatro el número de agujeros pasando de apenas 150 a cerca de 600 por broca.

Otra empresa del mismo sector utiliza insertos de metal duro para tronzar Inconel 718. Con la aplicación del proceso criogénico son capaces de cortar dos piezas por arista cuando antes sólo podían cortar una.

También otros sectores pueden beneficiarse de la aplicación de los tratamientos criogénicos. Una empresa portuguesa de forja en caliente ha realizado diversas pruebas con el tratamiento criogénico multietapa aplicado a sus estampas de martillo. La conclusión es que el proceso duplica la vida de las estampas, fabricadas en acero H13. Este resultado es similar al conseguido con el proceso de nitruración, pero tiene la ventaja de que afecta a todo el material (la nitruración es superficial) lo cuál permite reparar las estampas si se deterioran. Por ello es la opción que están utilizando para sus nuevos utillajes.

Una empresa fabricante de pasta de papel situada en el sur de Francia utiliza grandes cuchillas de HSS para triturar los troncos que llegan a la fábrica y convertirlos en astillas. Con la aplicación del tratamiento criogénico multietapa la vida de las cuchillas se ha triplicado. Si se tiene en cuenta que, hasta ahora, las cuchillas se tenían que cambiar y afilar a diario, es fácil comprender la importante ganancia en productividad conseguida gracias al proceso.

Hay numerosos ejemplos de este tipo y la lista de resultados positivos crece día a día. Pero los tratamientos criogénicos no funcionan en todas las situaciones y es preciso tener presente que cada caso es diferente y que hay muchos factores que influyen en los resultados. Por ello es conveniente probar y evaluar cuidadosamente cada aplicación en condiciones reales de funcionamiento.

## **8. Perspectivas futuras**

Los tratamientos criogénicos son una tecnología muy joven y tienen un futuro prometedor. Las perspectivas de crecimiento en Europa son buenas ya que en este continente existe un retraso significativo en su utilización.

Uno de los aspectos que ha de desarrollarse es el relativo al I+D. La investigación tiene que apuntar hacia dos vías: la explicación de los fundamentos del proceso y la evaluación de nuevas aplicaciones. En el ámbito internacional parece que el peso del estudio de la tecnología se está desplazando desde Norteamérica, donde comenzó hace tres décadas, hacia Asia. Actualmente hay varios grupos muy activos en este continente (China, India, Singapur...) que están investigando acerca de los procesos y sus aplicaciones [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

En Europa la situación es bastante distinta. Aparte de algunos trabajos aislados, el único grupo de investigación que está realizando con cierta regularidad trabajos relacionados con los tratamientos criogénicos está en la universidad italiana de Trento [13, 14, 15]. Afortunadamente el panorama parece que empieza a cambiar. Recientemente se ha aprobado un proyecto europeo, el primero relativo a la

tecnología de los tratamientos criogénicos, titulado “Improvement of Automotive Tools and Components through the Application of Deep Cryogenic Treatments”. Este proyecto, que se promovió desde Cryobest International, S.L. y cuenta con una mayoritaria participación española, puede ser el inicio del despegue definitivo de la investigación relacionada con los tratamientos criogénicos en Europa.

Otro aspecto que probablemente pueda evolucionar es el de los procesadores criogénicos. Cryobest es una de las pocas empresas que fabrican este tipo de equipos (la mayor parte son americanas) y, para ello, cuenta con tecnología propia. Estos equipos son capaces de realizar procesos multietapa y cada vez son más versátiles y eficientes.

Recientemente se ha concluido el proyecto denominado CRIOEFI realizado por Cryobest y parcialmente financiado por el programa Gaitek (Intek Berri) del Gobierno Vasco. En este proyecto, que se ha desarrollado durante año y medio, se ha analizado en detalle y se ha optimizado el funcionamiento de los equipos de tratamiento. Como conclusión del mismo se ha fabricado un prototipo de procesador que incorpora los resultados del proyecto. Este equipo (dimensiones interiores: 2130 x 550 x 600 mm.) está a disposición de las universidades, centros de investigación y áreas de I+D de las empresas (en condiciones favorables o, incluso, sin coste) para tratar cuantos materiales necesiten para sus proyectos o ensayos relacionados con el tema.

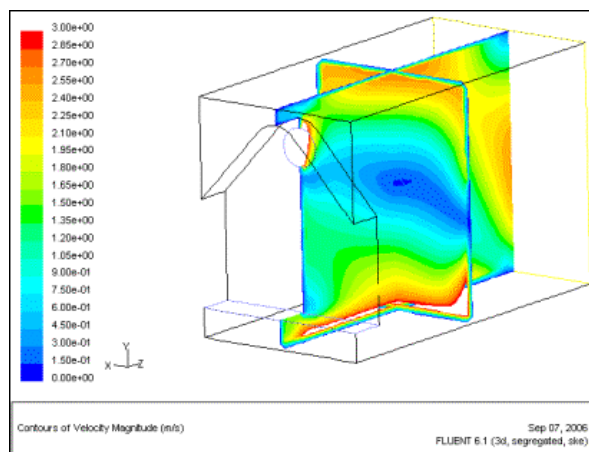


Fig. 3 – Simulación fluidodinámica de las velocidades de flujo en la cámara

En cuanto a la aplicación futura de la tecnología es de prever que se produzcan ciertos cambios. Hasta ahora, como se ha podido ver en los ejemplos anteriormente mencionados, los tratamientos criogénicos se están utilizando principalmente en herramientas y consumibles con el objeto de reducir costes y mejorar productividades. Esto es bastante lógico porque las pruebas experimentales suelen ser relativamente sencillas y suele encajar con las preocupaciones de las empresas. Por ello seguirá siendo una línea de negocio importante.

Una posibilidad, que podría suponer el uso masivo de este tipo de procesos en el futuro, es que los tratamientos se apliquen a componentes mecánicos o eléctricos con el objeto de mejorar sus prestaciones u optimizar su diseño. Este tipo de aplicaciones están más relacionadas con determinados efectos de los tratamientos criogénicos como, por ejemplo, la vida a fatiga o la conductividad que deben explorarse más a fondo. Un ejemplo de este tipo de aplicación podría ser las cajas de cambios de automóvil.

Introducir el uso de tratamientos criogénicos en este tipo de productos no es fácil ya que son necesarios largos y costosos ensayos para comprobar su viabilidad. A cambio, los volúmenes a tratar serían muy importantes lo cuál incidiría en la reducción de los costes y demandaría la fabricación de grandes instalaciones de tratamiento.

## 9. Conclusiones

El tratamiento criogénico de materiales es una tecnología cuyo potencial está muy poco explotado. Su desarrollo es reciente y ha sido prácticamente empírico ya que aún no se conocen con detalle los fundamentos teóricos del proceso.

Los materiales que responden a este tipo de tratamientos son muy variados y las aplicaciones son innumerables, pudiéndose encontrar en prácticamente todos los sectores. El tratamiento proporciona mejoras en el rendimiento de los componentes que se manifiestan principalmente en mejoras en la resistencia al desgaste y a la fatiga.

Los tratamientos criogénicos son procesos térmicos que afectan a todo el volumen del material tratado. A su vez son perfectamente compatibles con los recubrimientos habituales en la industria.

Se espera un rápido incremento en el uso de este tipo de procesos en Europa ya que este continente está muy retrasado en la aplicación de este tipo de tecnologías. El crecimiento estará acompañado por una creciente actividad en el ámbito de la I+D, especialmente en lo referente al estudio del proceso en materiales no férricos y a la búsqueda de nuevas aplicaciones.

## Referencias

- [1] "Cryogenics. Do temperature below  $-120^{\circ}\text{F}$  help?". R.F. Barron (1974).
- [2] "Cryogenic treatment produces cost savings for slitter knives". R.F. Barron (1974).
- [3] "Role of eta-carbide precipitations in the wear resistance improvements of Fe-12Cr-Mo-V-1.4C tool steel by cryogenic treatment" F. Meng, K. Tagashira, H. Shoma (1993).
- [4] "Microstructure of cryogenic treated M2 tool steel" J.Y. Huang, Y.T. Zhu, X.Z. Liao, I.J. Beyerlein, M.A. Bourke, T.E. Mitchell (2003).
- [5] "Improving component wear performance through cryogenic treatment" R.N. Wurzbach, W. DeFelice (2003).
- [6] "Effect of deep cryogenic treatment on electrode life and microstructure for spot welding hot dip galvanized steel" Wu Zhisheng, Shan Ping, Lian Jinrui, Hu Shengsun (2003).
- [7] "Effects of deep cryogenic treatment on property of 3Cr13Mo1V1.5 high chromium cast iron" H. Liu, J. Wang, B. Shen, H. Yang, S. Gao, S. Huang (2005).
- [8] "Enhancing the wear resistance of case carburized steel (En 353) by cryogenic treatment" A. Bensely, A. Prabhakaran, D. Mohan Lal, G. Nagarajan (2004).
- [9] "Fatigue life improvement of AISI 304L cruciform welded joints by cryogenic treatment" P. Johan Singha, B. Guhab, D.R.G. Acharb (2002).
- [10] "Performance evaluation of cryogenically treated tungsten carbide tools in turning" A.Y.L. Yong, K.H.W. Seah, M. Rahman (2005)
- [11] "Rolling contact fatigue studies on case carburized and cryogenic treated en 353 gear material" V. Manoj, K. Gopinath, G. Muthuveerappan (2004).
- [12] "Study on cryogenic phase change & wear characteristic of high speed steel" M.C. Huang, C.H. Gao, L.G. Huang (2003).
- [13] "Effect of deep cryogenic treatments on the mechanical properties of tool steels" A. Molinari, M. Pellizari, S. Gialanella, G. Strafellini, K.H. Stiasny (2001).
- [14] "Deep cryogenic treatment of cold work tool steel" M. Pellizari, A. Molinari (2004).
- [15] "Deep cryogenic treatment of AISI M2 high speed steel" M. Pellizari, A. Molinari, L. Girardini, L. Mandarelli (2006).
- [16] "Effect of cryogenic treatment on the mechanical properties of 4340 steel" S. Zhirafar, A. Razaean, M. Pugh (2006)
- [17] "Effects of cryogenic treatment on the residual stress and the mechanical properties of an aerospace aluminium alloy" P. Chen, T. Malone, R. Bond, P. Torres (2000).