

CONSIDERACIONES SOBRE APLICACIONES INDUSTRIALES DE METALES SUB-MICROMÉTRICOS

Considerations on industrial applications sub-micrometric metals

RESUMEN

El objetivo de este artículo es proporcionar información relevante sobre aplicaciones industriales de metales con tamaño de grano ultrafino (< 1000 nm) y nanométrico (< 100 nm). Se ilustra como los procesos de deformación plástica severa tienen una elevada proyección industrial para la obtención de estos metales especiales. En el texto se realiza un análisis de actuales y futuras aplicaciones a nivel estructural, médico, deportivo, militar y aplicaciones debido al fácil procesamiento de este tipo de materiales. Adicionalmente se analizan las razones de la lenta introducción de estos materiales a nivel industrial y las posibles alternativas que permitirían que estos sean más rápidamente producidos y empleados.

PALABRAS CLAVES: Deformación plástica, grano nanométrico, grano ultrafino.

ABSTRACT

The objective of this paper is to provide relevant information about industrial applications of metal with ultra-fine (>1.000 nm) and nanocrystalline (< 100 nm) grain size. It illustrates how severe plastic deformation processes have the greatest industrial projection for obtaining these special metals. On the text, current and future applications analyses in relation to structural, medical, sportive, military and applications because of its easy processing, are made. Furthermore, the slow implementation of these materials at industrial level and the possible alternatives that would allow them to be widely employed within an industrial framework, are analyzed.

KEYWORDS: Plastic deformation, nanocrystalline, ultrafine grain size.

1. INTRODUCCIÓN

Los metales, debido a su versatilidad y fácil procesamiento, continúan teniendo una alta participación en el consumo general de materiales en los más variados campos de la industria. Consecuentemente, en la actualidad, un importante número de centros de investigación reúnen sus esfuerzos buscando mejorar las propiedades de este tipo de materiales. Entre los diferentes mecanismos para mejorar las propiedades mecánicas, el refinamiento de grano es el único método que se ha mostrado eficaz para incrementar simultáneamente la resistencia y la tenacidad de los materiales. Por lo tanto, metales con tamaño de grano inferior a decenas de nanómetros tienen un gran potencial para reemplazar metales aleados de alto costo. Los investigadores vanguardistas en el área han denominado los materiales policristalinos con tamaño de grano inferior a 1 μm como: Materiales con Grano Ultrafino UFG (del acrónimo en inglés ultra-fine grain), y materiales nanométricos NC con tamaño de grano inferior a 100 nm. [1-3].

Un amplio número de investigaciones dentro del campo de la producción de materiales con estructura de grano UFG y NC, han llevado a la creación de variadas técnicas para obtenerlos. Dentro de estas técnicas sobresale la deformación plástica severa (SPD del acrónimo en inglés Severe Plastic Deformation), que ha atraído especial atención porque ofrece nuevas oportunidades para la implementación industrial de tecnologías de fabricación para diversos productos en forma de planchas, barras, láminas delgadas y alambres [4]. Una descripción detallada de las diferentes técnicas SPD, puede encontrarse en el trabajo de Rodríguez et al. 2008 [5].

Este trabajo enfoca su discusión en las actuales condiciones y futuras perspectivas de aplicación industrial de los metales UFG/NC, obtenidos por la técnica de Deformación Plástica Severa. Inicialmente, es importante examinar la evolución de la técnica SPD, siendo la molienda mecánica (MM) [6], la extrusión en canal angular (ECAP) [7] y la torsión a alta presión (HPT) [8], las primeras técnicas utilizadas en la producción de estructuras de metales y aleaciones que

ELIANA LÓPEZ LÓPEZ

Ingeniería Industrial
Universidad Nacional de Colombia
Sede Manizales
elianallopez@gmail.com

LUIS EDGAR MORENO

Ingeniero Industrial M.S.C
Profesor Asociado
Universidad Nacional de Colombia
Sede Manizales
lemorenom@unal.edu.co

RODOLFO RODRIGUEZ B.

Ingeniero Mecánico, Ph.D.
Profesor Asociado
Universidad Nacional de Colombia
Sede Manizales
rrodriguezba@unal.edu.co

poseen tamaño de granos en niveles submicrométricos e incluso nanométricos. En los últimos años, algunas técnicas alternativas de procesamiento SPD se han desarrollado como el corrugado-estirado repetitivo [9], la laminación acumulada [10], la extrusión con giro (TE), la forja multi-direccional (MDF) y ciclos de extrusión-compresión, siendo estos tres últimos tratados por Valiev et al. [4].

2. APLICACIONES INDUSTRIALES

Aunque a nivel de laboratorio se presenta el desarrollo de metales UFG/NC, la producción en masa, con una fuerte perspectiva de comercialización, es donde se centra la total importancia, pues pueden tener un enfoque aplicativo en la optimización de procesos industriales y productos finales, para generar mejoras que se traduzcan en beneficios para el cliente final y para el medio ambiente.

Es por ello que a continuación se muestran diferentes aplicaciones actuales de estos materiales desde seis perspectivas, afirmando que, si bien se espera que estos metales avanzados sean poco reconocidos y de alto valor de adquisición inicialmente, como la mayoría de tecnologías en la fase de introducción al mercado, tiene un futuro prometedor en aplicaciones potenciales gracias al incremento de sus propiedades físicas y mecánicas, tendiendo a reemplazar algunos de los metales convencionales.

2.1. ESTRUCTURALES

Estructuras desde el esqueleto humano hasta construcciones civiles colosales, comparten objetivos comunes en cuanto a soportar cargas manteniendo su forma. Aunque el diseño influye en gran medida, es el propio material de estos elementos el que genera la mayor atención para aumentar el desempeño ante condiciones mecánicas exigentes. En este ámbito, los metales UFG/NC pueden lograr tal desempeño a través del refinamiento de grano obtenido por procesos SPD.

Particularmente se ha obtenido alta resistencia mecánica, ductilidad y resistencia a la fatiga en metales como acero, cobre y titanio UFG [11]. Estas propiedades, acordes a las necesidades de los objetivos estructurales, han permitido emplearlos en diversos elementos de máquinas. Algunos ejemplos destacables son los pernos fabricados con Ti UFG procesado por extrusión angular ECAP [12]. Adicionalmente, pernos a nivel milimétrico son fabricados mediante laminado en caliente y enfriamiento controlado a partir de largas barras de acero al carbón UFG procesado por ECAP [13].

2.2. MAQUINABILIDAD

La calidad del maquinado depende principalmente de las propiedades mecánicas (tenacidad y dureza) de los materiales de la pieza de trabajo y de las herramientas de corte. Por tanto, el material tiene gran participación en los costos de producción, ya sea por la necesidad de reemplazar las herramientas de corte por desgaste, o por el bajo aprovechamiento de la maquinaria al utilizar velocidades lentas de corte que disminuyen la productividad. En la presencia de tales dificultades, los metales UFG/NC entran a competir, pues si se reemplaza la pieza de trabajo de metal convencional, por un metal UFG/NC procesado por SPD, la velocidad y la profundidad de corte pueden tener significativos incrementos, obteniendo mayor número de piezas mecanizadas en igual periodo de tiempo. Así mismo, el acabado de la pieza mecanizada es más uniforme por lo que pueden evitarse procesos de acabado finales, reduciendo costos de operación [14].

2.3. CONFORMABILIDAD

La superplasticidad (alta deformación sin presentar falla), es una característica de gran interés en la industria del conformado de metales. La posibilidad de obtener formas complejas a altas velocidades de deformación y bajas temperaturas, implica un ahorro significativo en procesos industriales de conformado. Formas con esquinas abruptas y superficies curvas, que deban soportar altas cargas y mantener su estructura, son evitadas en la industria ya sea por su dificultad o por su alto costo de conformación, sin embargo los metales UFG/NC con sus propiedades mejoradas, pueden revolucionar el sector industrial dedicado al conformado de metales.

Aleaciones convencionales con tamaño de grano, generalmente menor a 10 μm , tienen capacidad de presentar alta elongación antes de la rotura, por lo que pueden promover una producción a bajo costo de piezas de formas complejas, aplicables a la industria automotriz, de equipos deportivos y componentes arquitectónicos, entre otras [14]. En procesos como la forja, puede lograrse un ahorro de energía de hasta un 30% como consecuencia de la reducción de las temperaturas de conformado [11].

Como ejemplos destacables, puede mencionarse que mediante el proceso ECAP se ha estudiado la posible deformación mayor al 2000% de aleaciones Zinc-Aluminio empleando una velocidad de deformación de 1 s^{-1} [15]. Mediante esta misma técnica se ha logrado producir dispositivos metálicos de amortiguamiento sísmico de alto desempeño [14, 16]. La figura 1 ilustra láminas de acero de bajo carbono de 2 mm de espesor, producidas por procesos termomecánicos y formadas mediante embutido profundo con una relación de

embutido de 1.9; siendo una proporción muy abrupta que en metales convencionales produce habitualmente fallas como el desgarrado [17].



Figura 1. Embutido profundo en láminas de acero de grano ultrafino [17].

2.4. MEDICO

El titanio ha sido el material más utilizado para implantes médicos al tener las mejores características de biocompatibilidad y resistencia al desgaste. Sin embargo el titanio puro y sus aleaciones no satisfacen completamente el mercado, ya que propiedades como resistencia a la tracción y ductilidad no presentan el valor exigido. En este contexto, las técnicas SPD muestran nuevamente su potencial ya que el refinamiento de grano del titanio UFG/NC procesado mediante esta técnica ofrece un límite elástico de hasta 1100 MPa, dato incluso mayor a los proporcionados por muchas de las costosas aleaciones de titanio [11].

Tanto tornillos, placas y acoples como los mostrados en la figura 2, así como implantes dentales, de cadera y de rodilla, son aplicaciones ortopédicas que se han logrado fabricar en titanio UFG/NC con todas las características de diseño y propiedades necesarias que requiere la aplicación [11]. Esto solucionará el problema del costo de aleaciones complejas o de procesos secundarios de endurecimiento por deformación o tratamiento térmico [18], mejorando situaciones problemáticas a nivel medico-social y económico-industrial al reemplazar los costosos implantes que se emplean tradicionalmente.

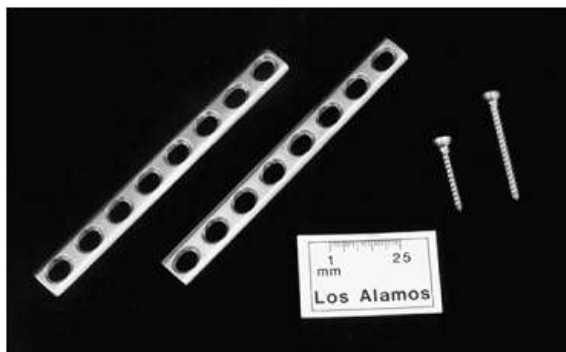


Figura 2. Implantes fabricados de titanio nanocristalino [11].

2.5. DEPORTES

El desempeño de un deportista no sólo obedece a su entrenamiento físico en técnica, velocidad y resistencia, o a las condiciones psicológicas que lo llevan a soportar la presión del juego, sino también, depende de las características de los elementos deportivos que acompañan cada una de las disciplinas existentes, que aunque innumerables, tienen algunas necesidades en común, como la adecuada relación resistencia-peso para sus equipos. Las aplicaciones de los metales UFG/NC en la industria del equipamiento deportivo prometen gran auge debido a la mejora de tales aspectos, específicamente en relaciones de altas resistencia y ductilidad, y bajo peso. El mercado puede abarcar la industria de fabricación de bicicletas, equipo de navegación, de montañismo, tenis, hockey, entre otras.

La empresa Nanodynamics, Inc. es la creadora de las pelotas de golf bajo la marca NDMX, elemento deportivo de alto rendimiento cuyo núcleo hueco está fabricado de titanio NC. Su mayor logro fue aumentar el momento de inercia de la pelota minimizando la densidad del centro, maximizando la densidad del exterior y de la misma manera, obteniendo menor número de giros en un periodo de tiempo para finalmente lograr un tiro más certero. En conclusión, la característica principal que respaldó el éxito de tal innovación fue la reducción de la densidad y por ende del peso en el núcleo, y además, sosteniendo o de hecho mejorando la resistencia al impacto, al utilizar un metal avanzado para la fabricación de su núcleo [19, 20]. En términos de otras disciplinas, actualmente es bastante común la producción de partes de bicicletas, tanto de montaña como de ruta, desde la estructura básica hasta engranajes, pedales, manubrios, rines y radios de las ruedas. Finalmente, en implementos deportivos para tenis y squash, el fabricante de la marca HEAD creó la tecnología HEAD Metallix basada en la técnica de electrodeposición de metales NC, para lograr raquetas más ligeras y potentes [11] [21].

2.6. MILITAR Y TRANSPORTE

A nivel militar, la seguridad de los dispositivos electrónicos, así como la resistencia de los materiales de defensa, son dos aspectos de alta importancia en los que los materiales NC/UFG tienen gran cabida. Pero específicamente, las aplicaciones más prometedoras se desarrollarán en torno a la relación resistencia – peso, y en torno a propiedades de alta resistencia al impacto. La empresa Integran Technologies es reconocida en aplicaciones en revestimientos de aleaciones de Níquel NC en la industria aeroespacial, militar y de defensa de Estados Unidos [22]. Sin embargo, en este tipo de industrias, más allá de la seguridad de la información con estos revestimientos inteligentes, los materiales de blindaje para vehículos militares, se desarrollan a gran escala, ya que benefician la reducción del consumo de

combustible, el alcance de mayores velocidades y la maniobrabilidad, por la disminución de la cantidad empleada en sus materiales. Incluso, la empresa productora proyecta en corto tiempo implementar esta innovación a vehículos de transporte comercial [11].

Adicionalmente, es resaltable el desempeño de proyectiles, pues con metales UFG/NC se ha observado un incremento de la tenacidad en la asimilación del impacto después del choque. Tanto procesos termoquímicos (electrodeposición de aleaciones de nanoníquel), como procesos de SPD (molienda mecánica a bajas temperaturas), se han utilizado para obtener metales UFG/NC que mejoran el desempeño balístico. Un ejemplo importante corresponde a láminas de aluminio 5083, con estructura UFG producto de la molienda mecánica, consolidación hidro-estática en caliente y finalmente un proceso de forja y laminado. Este Al UFG presenta un límite elástico entre 600 y 700 MPa, con un porcentaje de elongación del 11%, y aún más importante, un aumento del 33% en su tenacidad con un porcentaje equivalente de reducción de masa con referencia a la misma aleación pero con tamaño de grano convencional [23].

3. LIMITACIONES DEL PROCESO

En la práctica a pesar del mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas de metales UFG/NC producidas por la técnica SPD, la utilización de estos materiales en la industria ha sido muy lenta. Hay varias razones responsables de esta situación: 1) La limitada conciencia industrial del potencial de estos materiales, pues a pesar de la existencia de muchos grupos de investigación alrededor del mundo trabajando en el tema, que presentan sus avances en congresos internacionales, los industriales no han dimensionado el potencial de estos materiales. 2) La corta longitud de las piezas UFG/NC obtenidas mediante procesos SPD, que a nivel de laboratorio cubren las necesidades de tamaño para observar su microestructura y propiedades básicas, pero que a nivel industrial es muy limitado lo que se pueden hacer con ellas. 3) La presencia de microestructuras no uniformes y fisuras que aumentan la probabilidad de una falla prematura del material, restringen aún más las aplicaciones. 4) Y finalmente, de todas las técnicas y sus derivaciones mencionadas anteriormente no hay claridad sobre la más adecuada de implementar a nivel industrial. Como resultado, los potenciales productores de metales NC/UFG dudan sobre el método de producción que han de implementar, y por tanto, se presenta la incertidumbre de la viabilidad comercial de estos materiales, los cuales dependen de la demanda del mercado potencial y el costo de producción [11-17].

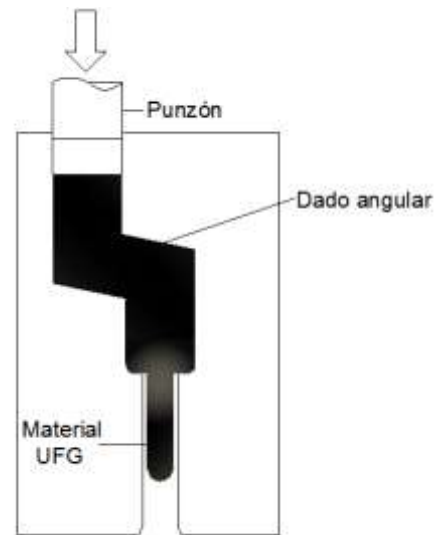


Figura 3. Proceso que integra deformación angular y extrusión [24].

Por tanto, el paso necesario para la comercialización de estos materiales es la reducción de los costos de producción y la reducción del material no utilizable. Estos dos requerimientos pueden ser cubiertos mediante la introducción de técnicas SPD de procesamiento continuo. Algunos intentos han sido realizados en busca de este objetivo, destacándose el proceso ilustrado en la figura 3 que integra deformación angular y extrusión [24], el proceso continuo cortante [25], y la combinación de ECAP con el conformado continuo [26-27]. Este último proceso ilustrado en la figura 4, que consiste en la alimentación constante del material que pasa por un canal angular, guarda gran expectativa por parte del sector industrial.

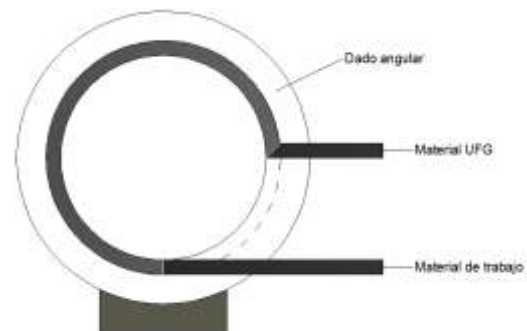


Figura 4. Proceso ECAP continuo. [26]

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El proceso de deformación plástica severa ofrece nuevas oportunidades para la implementación industrial de metales con tamaño de grano ultrafinos y nanométricos en diversos productos en forma de planchas, barras, láminas delgadas y alambres. Sin embargo, a pesar del mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas, la apropiación de estos materiales por la industria ha sido

muy lenta debido a la limitada divulgación del potencial de estos materiales y las dificultades para obtener piezas continuas de microestructura uniforme y libres de defectos.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Gleiter, Nanocrystalline materials. Progress Materials Science, Vol. 33, pp. 223–315, 1989
- [2] C. Suryanarayana, Nanocrystalline materials. International Materials Reports, Vol. 40, pp. 41–64, 1995
- [3] Y.M. Wang, M. Chen, F Zhou, E Ma, Nature, Vol. 419 pp. 912–915, 2002.
- [4] R. Valiev, Y. Estrin, Z. Horita, T. Langdon and M. Zehetbauer, Producing Bulk Ultrafine-grained Materials by Severe Plastic Deformation, JOM, Vol. 58, pp 33-39, 2006.
- [5] R. Rodriguez, A. Benito, J. Cabrera, Obtención De Materiales Metálicos De Tamaño De Grano Ultrafino. Scientia et Technica, Vol. XIV, No. 38, Junio, 2008.
- [6] C.C. Koch, Optimization of strength and ductility in nanocrystalline and ultrafine grained materials, Scripta Materialia, Vol. 49, pp 647-662, 2004.
- [7] R.Z. Valiev, I.V. Alexandrov, Y.T. Zhu and T.C. Lowe, Paradox Of Strength And Ductility In Metals Processed By Severe Plastic Deformation., Journal Materials Research, Vol. 17, pp. 5-8, 2002.
- [8] A. Vorhauer, R. Pippin, On The Homogeneity Of Deformation By High Pressure Torsion, Scripta Materialia, Vol. 51, pp 921. 2004
- [9] J.Y. Huang, Y. Zhu, J. David, X. Liao, T.C. Lowe, R.J. Asaro, , Development Of Repetitive Corrugation And Straightening., Materials Science and Engineering A, Vol. 371, No. 1-2, pp 35-39, 2004.
- [10] S.H Lee, T. Sakai, Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji, Strengthening Of Sheath-Rolled Aluminum Based MMC By The ARB Process, Materials Transaction JIM, Vol. 40, pp. 1422, 1999.
- [11] A. Azushima, R. Kopp, A. Korhonen, D.Y. Yang, F. Micari, G.D. Lahoti, P. Groche, J. Yanagimoto, N. Tsuji, A. Rosochowski, A. Yanagida. Severe plastic deformation (SPD) processes for metals. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 57 pp. 716–735, 2008.
- [12] V.S. Zhernakov, R.G. Yakupo, Calculation of Bolt and Rivet Type Connections at High Temperatures and Dynamic Loads. M AI Publisher Mosku, pp. 218, 1997.
- [13] M. Wakita, K. Kawano, T. Tomida, Microstructures and Mechanical Properties of Ultrafine-grained Steel Due to Super Short Interval Multi-pass Rolling. Proceedings of ISUGS 2007, Kokura, Japan, 8–10. 2007.
- [14] Y.T. Zhu, T.C. Lowe, T.G. Langdon, Performance and applications of nanostructured materials produced by severe plastic deformation, Scripta Materialia, Vol. 51, pp. 825-830. 2004.
- [15] S.M. Lee, T.G. Langdon. Materials Science Forum, Vol. 357–359, pp. 521-526: 2001.
- [16] Z. Horita, K. Matsubara, K. Makii, T.G. Langdon, A two-step processing route for achieving a superplastic forming capability in dilute magnesium alloys, Scripta Materialia. Vol. 47, pp. 255-260, 2002.
- [17] M. Wakita, H. Tokuda, Y. Adachi, T. Tomida, N. Minakawa, A. Moriai, Y. Morii, Tensile behavior of TRIP-aided multi-phase steels studied by in situ neutron diffraction, Acta Materialia, Vol. 52, No. 20, pp. 5737-5745, 2004.
- [18]. R. Z. Valiev, I.P. Semenova, E. Jakushina, V.V. Latysh, H. Rack, T.C. Lowe, J. Petruželka, L. Dluhoš, D. Hrušák, J. Sochová, Nanostructured SPD Processed Titanium for Medical Implants, Materials Science Forum, Vol. 584-586, pp. 49-54, 2008.
- [19] What is Behind the Hollow Metal Core Golf Ball Hype? MOI of Course. (May 2007) [Online]. Available: <http://golf-patents.com/2007/05/25/what-is-behind-the-hollow-metal-core-golf-ball-hype-moi-of-course.aspx>
- [20] Mulligan Stu , Promising Technology - Terrible Golf Ball, (May 2007) [Online]. Available: <http://www.waggleroom.com/2007/5/25/114452/931>
- [21] HEAD Metallix, Powermetal Technologies Inc, (2010) [Online]. Available: <http://www.head.com/tennis/technology.php?region=eu&tag=metallix>
- [22] Conventional Polycrystalline Microstructure of Metals, Nanovate Nanostructure, (2010) [Online]. Available: <http://www.integran.com/pages/technologies.html>.
- [23] A.P. Newbery, S.R. Nutt, E.J. Lavernia, Multi-scale Al 5083 for Military Vehicles with Improved Performance, JOM, Vol. 58 No. 4, pp. 56–61, 2006.
- [24] Y. Saito, H. Utsunomiya, H. Suzuki, T. Sakai, Improvement in the r-value of aluminum strip by a continuous shear deformation process, Scripta Materialia, Vol 42, pp. 1139, 2000.
- [25] J. C. Lee, H. K. Seok, J. Y. Suh, Microstructural evolutions of the Al strip prepared by cold rolling and continuous equal channel angular pressing, Acta Materialia, Vol. 50, pp. 4005-4019, 2002.
- [26] G. J. Raab, R. Z. Valiev, T. C. Lowe, Y. T. Zhu, Continuous processing of ultrafine grained Al by ECAP–Conform, Materials Science Engineering A, Vol 382, pp. 30-34, 2004.
- [27] Z.H. Chen, Y.Q. Cheng, W.J. Xia, Materials Manufacturing Processes. Vol 22, pp 51, 2007.