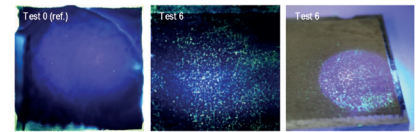


Mejora de propiedades tribológicas mediante aporte por láser de recubrimientos de AISI H13 y WC



Enhancement of tribological properties by laser metal deposition of AISI H13 and WC coatings

■ ■ ■ ■

Marta Ostolaza-Gaztelupe, Magdalena Cortina-Burón, Jon-Iñaki Arrizubieta-Arrate y Aitzol Lamikiz-Mentxaka

Universidad del País Vasco. Dpto. de Ingeniería Mecánica. Plaza Torres Quevedo, 1 - 48013 Bilbao (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9623> | Recibido: 27/12/2019 • Inicio Evaluación: 27/12/2019 • Aceptado: 10/02/2020

ABSTRACT

- In the last few years, the requirements that manufacturers demand in terms of material specifications have risen considerably. The highly competitive industry leads to the development of new materials by means of alternative manufacturing processes, such as Metal Matrix Composites (MMC) manufactured by Laser Metal Deposition (LMD). Coatings made from metal matrix composites reinforced with ceramic particles are of particular interest in the manufacturing of dies and molds for hot stamping processes, as they allow improving the wear behavior even when working in aggressive environments. This permits increasing the lifespan of these high-added-value components. To analyze this kind of coating, monolayer specimens constituted by hot work tool steel (AISI H13) and tungsten carbide (WC) have been deposited. The high hardness of the WC may lead to a considerable improvement in the tribological and mechanical properties. In order to characterize and quantify this enhancement, wear tests have been performed in coatings manufactured with different concentrations of WC. In addition, the metallurgical integrity of the deposited clads has been analyzed. Lastly, the hardness of the clads has been measured. It has been concluded that this kind of multi-material coatings leads to an increase of the wear resistance and hardness. However, it is necessary to control the dilution of the reinforcing phase in the matrix, and to use adequate post-processing methods since, given the high hardness of the clads, the tendency to crack also increases.
- **Keywords:** Metal Matrix Composites, Laser Metal Deposition, hardness, wear, die and mold, hot stamping, tungsten carbide, hot work tool steel, metallurgical integrity.

RESUMEN

En los últimos años han aumentado considerablemente los requisitos exigidos por los fabricantes en cuanto a especificaciones de materiales. Una industria altamente competitiva lleva al desarrollo de nuevos materiales mediante técnicas de fabricación alternativas, como es el caso de los Composites de Matriz Metálica (MMC) fabricados mediante aporte por láser o *Laser Metal Deposition* (LMD). Los recubrimientos realizados mediante composites de matriz metálica reforzados con partículas cerámicas son de particular interés para el sector de la troquelaría, ya que permiten mejorar la resistencia al desgaste de los troqueles aun trabajando en entornos agresivos. Esto permite aumentar la vida útil de estos componentes de alto valor añadido. Con el objetivo de analizar este tipo de recubrimientos, se han realizado aportes monocapa consti-

tuidos por acero de herramientas de trabajo en caliente (AISI H13) y carburo de tungsteno (WC), cuya alta dureza puede suponer una mejora considerable de las propiedades tribológicas y mecánicas. Para poder caracterizar y cuantificar esta mejora, se han realizado ensayos de desgaste en los recubrimientos generados con diferente concentración de WC y, además, se ha estudiado la integridad metalúrgica de los mismos. Por último, se ha estudiado la dureza resultante tras el aporte del recubrimiento. Se concluye que este tipo de aporte multi-material permite incrementar la resistencia al desgaste y dureza considerablemente, sin embargo, es necesario controlar la dilución de la fase de refuerzo en la matriz y emplear métodos de post-procesado adecuados, ya que, debido a las altas durezas alcanzadas, también aumenta la tendencia al agrietamiento del material.

Palabras clave: Composites de Matriz Metálica, *Laser Metal Deposition*, dureza, desgaste, troquel, estampación en caliente, carburo de tungsteno, acero de herramientas, integridad metalúrgica.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han centrado grandes esfuerzos de investigación en el diseño de nuevos materiales, el cual se enfrenta a diversos retos en función del campo de aplicación al que se enfoque. De este modo, han surgido distintas líneas de investigación en desarrollo de materiales, las cuales tienen entre sus objetivos aligerar el peso de componentes sin comprometer sus capacidades mecánicas [1], [2], alargar su vida útil [3] o permitir que dichos componentes trabajen en entornos más agresivos, ya sea en términos de trabajo a altas temperaturas o en entornos corrosivos [4].

Tradicionalmente, esta problemática se ha resuelto mediante el desarrollo de aleaciones que cumplan, en la medida de lo posible, los requisitos establecidos por la industria. Sin embargo, este método no permite dar solución a aplicaciones particulares que requieren materiales con propiedades metálicas que, a priori, son contrapuestas. Por ejemplo, el incremento de la dureza de un material se obtiene en detrimento de su ductilidad [6], [7]. Por ello, los Composites de Matriz Metálica (MMC) han sido desarrollados para dar respuesta a las exigencias de la industria en lo que a diseño de materiales se refiere [5]. Los MMC se suelen emplear habitualmente para la generación de recubrimientos y permiten obtener unas excelentes prestaciones de dureza, sin condicionar la ductilidad del mismo, lo que supone un gran reto desde la perspectiva tradicional del diseño de materiales [8].

Los materiales compuestos se definen como materiales constituidos por una combinación macroscópica de dos o más materiales, con una interfaz claramente reconocible entre ellos. Más específicamente, se restringe el término composites a aquellos materiales que se componen de una matriz continua que une las fases discretas del constituyente de refuerzo [9]. Los MMCs surgen entre 1950 y 1960 con la motivación de mejorar las propiedades de materiales metálicos estructurales, como el buen comportamiento a altas temperaturas, por ejemplo. Si bien es cierto que estos materiales tienen propiedades de fractura inferiores en la medida que aumenta la fase de refuerzo, sus principales ventajas son la mejora de la resistencia al desgaste [10], así como la de su comportamiento bajo ambientes térmicos agresivos [11]. En el caso de los MMCs, la matriz cumple, además de con la función de aglutinante, con una función estructural importante en lo que respecta al material compuesto resultante. Los MMCs con matrices base hierro son empleados principalmente en aplicaciones industriales de elevado desgaste, como puede ser el caso de recubrimientos para troqueles de estampación en caliente [12]–[14]. En definitiva, se obtienen materiales con unas propiedades específicas superiores [15].

Debido a la capacidad de estos materiales de adaptarse a los requisitos de productos específicos, se han invertido grandes esfuerzos de investigación en el desarrollo de los mismos [16]. Uno de los procesos de fabricación más empleados para la obtención de MMCs es la fabricación aditiva, en particular, el aporte por láser o Laser Metal Deposition (LMD) [10], [17], debido a su versatilidad en el procesamiento de materiales. En la Fig 1 se muestra el proceso de generación de un recubrimiento MMC mediante el aporte por láser o LMD. Asimismo, esta tecnología permite un aporte energético muy localizado de forma que se reduce la afección térmica en comparación con procesos de fusión tradicionales, obteniendo además propiedades mecánicas excelentes [18]–[20]. Gracias a estas características, es posible mejorar las propiedades tribológicas y mecánicas mediante el aporte por láser, ya que es posible obtener microestructuras finas y recubrimientos homogéneos, además de la ya mencionada baja cantidad de energía introducida en el proceso, lo que conlleva una reducción de la zona afectada térmicamente [21].

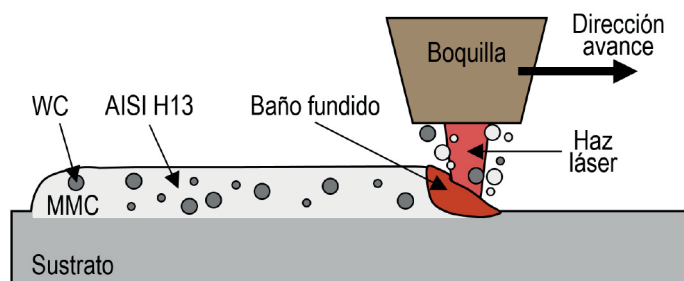


Fig. 1. Proceso de generación de un recubrimiento MMC mediante el proceso de LMD

Por otra parte, existen una serie de retos que plantea el proceso de aporte multi-material mediante LMD [10]: (1) Superar las diferencias termomecánicas entre los materiales a aportar, como la conductividad térmica, el rango de fusión y el coeficiente de expansión térmica, las cuales pueden contribuir a una distribución no homogénea de los materiales, resultando en aportes con propiedades mecánicas inferiores. Además, estas diferencias pueden dar lugar a aportes de dudosa integridad superficial, como consecuencia del agrietamiento de los mismos. El mecanismo de formación de estos defectos está principalmente ligado a las tensiones residuales locales generadas durante el proceso. (2) La falta

de miscibilidad entre los materiales puede afectar a la integridad metalúrgica de los aportes. (3) En el caso de los MMCs reforzados con fase cerámica, si el proceso de solidificación del mismo es demasiado lento, las partículas de refuerzo pueden acumularse en el fondo del baño fundido debido a su mayor densidad.

En la bibliografía destacan los MMCs reforzados con partículas de carburo de tungsteno (WC) [22]. Una de las aplicaciones más explotadas es la de recubrimientos superficiales que mejoren las propiedades superficiales de componentes trabajando bajo condiciones particularmente exigentes o entornos agresivos [23], [24]. Numerosos autores han concluido que la introducción de dichas partículas contribuye a una mejora de la resistencia al desgaste en la fabricación de recubrimientos superficiales, incluso a altas temperaturas. Sin embargo, debido a la alta dureza y, por tanto, fragilidad del carburo de tungsteno, se emplean matrices dúctiles. Nurminen et al. estudiaron la microestructura y propiedades mecánicas de recubrimientos compuestos por diferentes combinaciones de matrices metálicas y fases de refuerzo [25]. Fernandez et al., a su vez, analizaron la mejora de la resistencia al desgaste de recubrimientos de NiCrBSi fabricados mediante LMD y reforzados con carburo de tungsteno [26]. Durante el estudio concluyeron que la introducción de partículas cerámicas mejoraba el comportamiento frente al desgaste de los recubrimientos arriba mencionados y, además, estudiaron los mecanismos de desgaste principales en función del contenido en carburo de tungsteno del recubrimiento. Por otra parte, Wang et al. realizaron recubrimientos de aleación base cobalto reforzado con carburo de tungsteno sobre sustratos de acero de herramientas de trabajo en caliente, AISI H13. El objetivo de dicho trabajo era mejorar las propiedades superficiales de troqueles de estampación en caliente, siendo uno de sus modos de fallo predominantes el deterioro de la superficie del troquel debido a las cargas térmicas cíclicas, así como las cargas mecánicas a las que se ve sometido y el daño debido al desgaste [27]. Encontraron que, a medida que el contenido de carburo de tungsteno en el recubrimiento aumentaba, la resistencia al desgaste mejoraba considerablemente. Sin embargo, también aumentaba la concentración de grietas tras ser sometidos a ensayos de fatiga térmica. También se han realizado numerosos estudios empleando carburo de titanio como fase de refuerzo para la modificación de propiedades superficiales. Por un lado, Jiang y Molian analizaron el efecto de alear superficialmente acero de herramientas de trabajo en caliente AISI H13 con polvo TiC nanocristalino centrándose en su integridad metalúrgica y acabado superficial [21]. Jiang y Kovacevic estudiaron el efecto de los parámetros de fabricación en la morfología y microestructura al fabricar composites de matriz metálica de TiC y AISI H13 [28]. Por su parte, Gu et al. caracterizaron las propiedades metálicas de los MMCs de AISI H13 reforzados con TiC [29]. Por último, Norhafzan et al. estudiaron el efecto de los parámetros de aporte en la dureza superficial y la resistencia a la erosión de recubrimientos de TiNi sobre AISI H13 [30].

Sin embargo, hay pocos trabajos previos que estudien recubrimientos preparados con acero de herramientas de trabajo en caliente reforzados con partículas cerámicas de carburo de tungsteno. Este tipo de recubrimientos podría mejorar considerablemente las propiedades frente al desgaste de troqueles en comparación con los mencionados previamente, ya que están compuestos por una matriz metálica de alta dureza (AISI H13) a la que se le introducen partículas cerámicas de refuerzo que contribuyen a incrementar aún más, alcanzando valores más elevados que los que caracterizan a dicha matriz. En consecuencia, se puede obtener un incremento de la vida útil de estos componentes de alto valor añadido. Es esta falta de bibliografía la que ha motivado el presente

Material	Composición (% peso)										
	C	Cr	Mn	Mo	P	S	Si	V	Fe	W	Otros
Sustrato (CR7V-L)	0,42	6,50	0,40	1,30	-	-	0,50	0,80	Bal.	-	-
Matriz metálica (AISI H13)	0,41	5,12	0,25	1,33	0,01	<0,01	0,80	1,13	Bal.	-	0,27
Fase de refuerzo (WC)	4,03	-	-	-	-	-	-	-	0,19	Bal.	0,03

Tabla 1. Composición de los materiales empleados [31]–[33]

Muestra	Caudal de AISI H13 [g/min]	Caudal de WC [g/min]	Potencia, P [W]	Velocidad de aporte, F [mm/min]
Test 0 (ref.)	3,30	-	600	450
Test 1	3,30	0,67	600	450
Test 2	3,30	1,00	600	450
Test 3	3,30	1,50	600	450
Test 4	3,30	1,50	800	450
Test 5	3,30	2,00	600	450
Test 6	3,30	2,00	800	450

Tabla 2. Parámetros de fabricación de recubrimientos

estudio, el cual tiene como objetivo la fabricación de recubrimientos con composites de matriz metálica orientados a la troquelaría y aceros de trabajo en caliente. Para ello, se han realizado aportes consistentes en una matriz metálica compuesta de una matriz de acero AISI H13 y reforzada con partículas de WC, y se han evaluado la integridad metalúrgica de dichos aportes, su resistencia al desgaste y las durezas de la capa aportada.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. MATERIAL Y EQUIPAMIENTO

En este estudio se han realizado aportes de acero de herramientas de trabajo en caliente (AISI H13) reforzado con partículas de carburo de tungsteno (WC) sobre sustrato de acero especial de trabajo en caliente (CR7V-L) cuya composición se detalla en la Tabla 1. Se ha empleado polvo de WC y polvo AISI H13, con una granulometría de 45–106 µm y 53–125 µm, respectivamente, para fabricar los recubrimientos.

Los principales elementos de aleación del acero de herramientas AISI H13 son el cromo, el molibdeno y el vanadio. Está caracterizado por tener una alta resistencia al choque y fatiga térmicos y buenas propiedades mecánicas incluso a altas temperaturas. Estas cualidades hacen que este material sea idóneo para la fabricación de herramientas. De hecho, el acero de herramientas de trabajo en caliente AISI H13 es habitualmente empleado en aplicaciones de troquelaría, extrusión e inyección de plástico [34]. Por otra parte, el acero especial de trabajo en caliente CR7V-L empleado como sustrato en este estudio, es también comúnmente utilizado en aplicaciones de trabajo en caliente, como en troqueles para la estampación de componentes estructurales del sector de automoción. Por su parte, destaca su excelente comportamiento a altas temperaturas y su gran resistencia al desgaste. Es similar al AISI H13 empleado como material de aporte, pero con un contenido menor en silicio y mayor en cromo.

Los aportes se han realizado en un centro de procesamiento láser de 5 ejes que está acoplado a un láser Rofin-Sinar FLO10 de Yb:YAG con potencia máxima de 1 kW y longitud de onda de 1070 nm. El diámetro del haz en el plano de trabajo es de 1,8 mm. Además, se ha utilizado un alimentador Sulzer Metco Twin 10-C, que permite aportar varios materiales simultáneamente mediante el empleo de

dos tolvas independientes. En lo que respecta a los gases empleados, se ha utilizado argón como gas de arrastre y de protección.

2.2. METODOLOGÍA

2.2.1 Ensayos experimentales

Los recubrimientos se han realizado sobre sustratos de CR7V-L de 50 x 50 x 6 mm³ previamente rectificadas. Además, se han limpiado con acetona antes de realizar los aportes, con el objetivo de eliminar las posibles impurezas que hubiera sobre la superficie, de forma que estas no afecten negativamente a la calidad de las probetas fabricadas. Asimismo, se ha ejecutado un ciclo de precalentamiento para reducir la tendencia a agrietamiento del material base. Las condiciones para el precalentamiento son de una potencia láser de 200 W y velocidad de avance de 450 mm/min.

Se han fabricado siete muestras distintas en las que se ha variado la composición de los recubrimientos y los parámetros de aporte. Tal y como se muestra en la Tabla 2, se han aportado recubrimientos en los que el porcentaje de WC varía desde un 0%, correspondiente al ensayo de referencia, hasta un 40%. Los recubrimientos resultantes tienen unas dimensiones de 45 x 45 mm² y constan de una única capa, con una altura de 166 µm, aproximadamente. Se han fabricado empleando una estrategia zigzag con un 50% de solape entre cordones. Además, durante el proceso de aporte y el ciclo de precalentamiento, se ha protegido el material de la oxidación con un caudal de 14 l/min de argón.

2.2.3 Caracterización mecánica de los recubrimientos

En primer lugar, se han ejecutado ensayos de *ball-on-disc* de acuerdo a la norma ASTM G99-95a [35] con el objetivo de comparar la resistencia al desgaste de los diferentes recubrimientos. Como parte de la preparación previa al ensayo de *ball-on-disc*, se han rectificado las muestras fabricadas para cumplir con las exigencias de la norma en cuanto a rugosidad superficial (Ra < 0,8 µm). Una vez rectificada la pieza, se ha limpiado su superficie con acetona para evitar que cualquier impureza superficial pueda influir en las medidas de desgaste.

En los ensayos *ball-on-disc*, los cuales se han realizado bajo las condiciones indicadas en la Tabla 3, se han empleado bolas de carburo de tungsteno y cobalto (WC 94/Co 6) de 6 mm de diámetro. Con el objetivo de cuantificar y entender el mecanismo de desgaste pre-

Radio de rotación [m]	Velocidad angular [rpm]	Distancia recorrida [m]	Fuerza de contacto [N]
0,015	270	1000	20

Tabla 3. Parámetros de ensayos ball-on-disc

dominante durante el ensayo, se han analizado (1) la evolución del coeficiente de fricción y (2) la superficie del disco tras los ensayos.

En segundo lugar, con el fin de determinar la integridad superficial de los aportes realizados, se han realizado ensayos de líquidos penetrantes en la probeta de referencia (Test 0) y en la probeta con mayor contenido en carburo de tungsteno (Test 6) tras el proceso de rectificado. De esta forma, se ha evaluado la sensibilidad al agrietamiento de los recubrimientos introducidos. Por último, se ha estudiado la integridad metalúrgica de los recubrimientos aportados y las microestructuras generadas en los aportes. Para ello, se han analizado las secciones transversales de los aportes realizados.

Tras el lijado y pulido metalográfico de dichas secciones, éstas se han atacado químicamente con los reactivos Murakami, Nital 4 y Marble, para revelar la macro y microestructura de los aportes. Además, se han realizado microindentaciones a lo largo de los recubrimientos con el objetivo de estudiar las durezas obtenidas en las diferentes zonas de los mismos. Para ello, se ha empleado un microdurómetro FM-800 de la marca Future-Tech Corp con los siguientes parámetros: (1) carga aplicada de 2,9 N (300 gf) y (2) tiempo de indentación de 12 s.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. RESISTENCIA AL DESGASTE

Para evaluar la resistencia al desgaste de los recubrimientos MMC, se ha evaluado el histórico del coeficiente de fricción (COF) obtenido durante los ensayos de ball-on-disc. Para ello, se han tomado los siguientes parámetros como indicadores relevantes:

- (1) COF medio en régimen estable como indicador de la resistencia al desgaste de los recubrimientos.
- (2) Oscilaciones detectadas en régimen estable como indicador del mecanismo de desgaste predominante.

En la Fig 2 se recoge, por una parte, la evolución del COF a lo largo de los ensayos ball-on-disc para cada una de las muestras analizadas y, por otra parte, el promedio del COF en régimen permanente. Se observa una clara mejoría de la resistencia al desgaste en las muestras a las que se les ha introducido un recubrimiento MMC, obteniendo valores promedio de COF de entre 0,1 y 0,17; frente al 0,57 registrado en el recubrimiento de AISI H13 tomado como referencia. Además, la fluctuación en el recubrimiento de referencia (Test 0) es mucho mayor, fenómeno que se atribuye a un predominio del mecanismo de desgaste por adhesión [36].

Con el objetivo de evaluar la resistencia al desgaste de una forma comparativa entre los diferentes recubrimientos evaluados, se ha analizado también la huella resultante en las muestras ensayadas. Para ello se ha medido el ancho de la misma para cada una de las probetas. Los resultados se recogen en la Fig 3, donde se observa una reducción considerable del ancho de la huella en los recubrimientos realizados con MMCs.

3.2. INTEGRIDAD SUPERFICIAL DE LOS RECUBRIMIENTOS

Con el objetivo de evaluar la integridad superficial de los recubrimientos, se ha realizado el ensayo de líquidos penetrantes y se ha valorado cualitativamente la calidad de los mismos. En la Fig 4 se muestran las probetas correspondientes a los ensayos 0 y 6, siendo el primero el recubrimiento de referencia compuesto

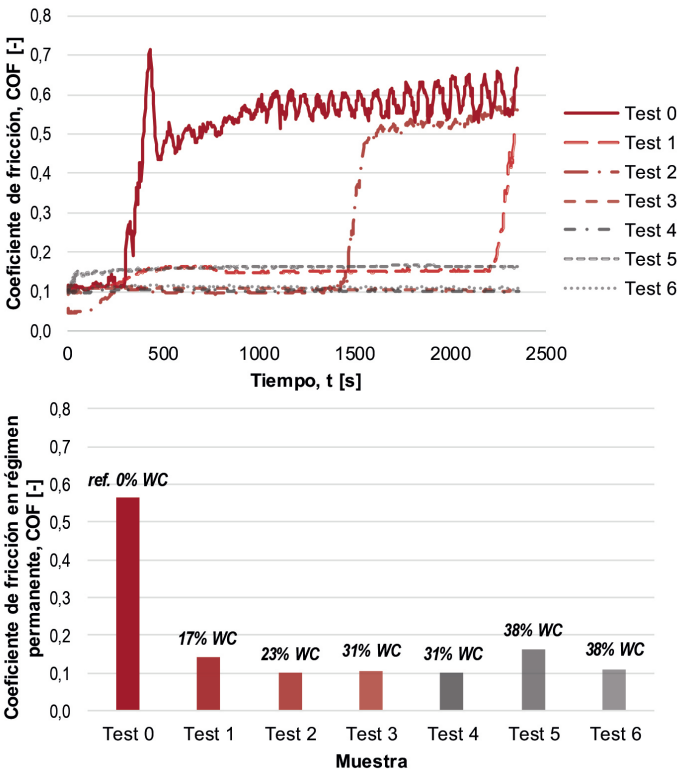


Fig. 2. Histórico del COF y COF promedio en régimen permanente

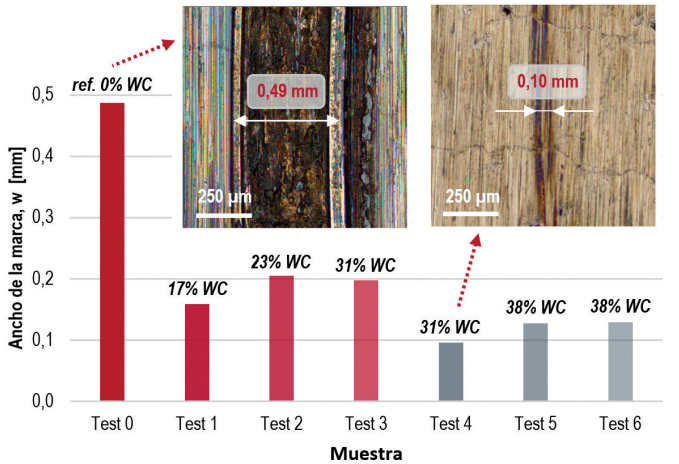


Fig. 3. Análisis de la huella tras los ensayos de desgaste

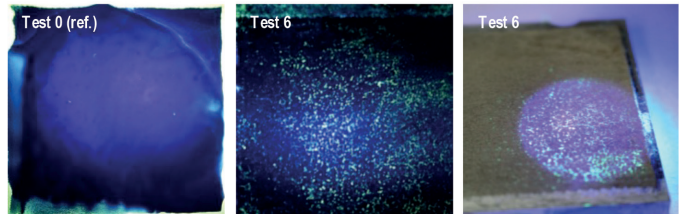


Fig. 4. Ensayos de líquidos penetrantes

únicamente por AISI H13 y el último, el recubrimiento con mayor contenido en WC, del 40%.

Si bien no se han encontrado defectos aparentes en el aporte de referencia, se observa un agrietamiento superficial severo en el recubrimiento MMC correspondiente al Test 6. Con el objetivo de

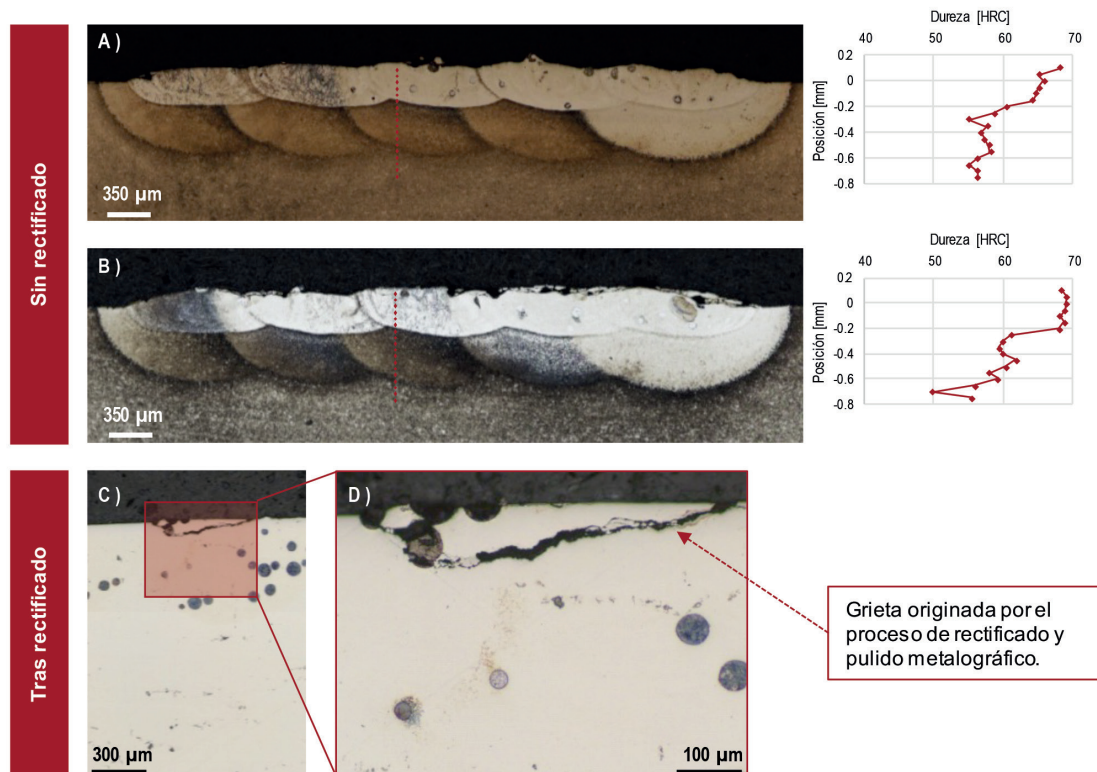


Fig. 5. Análisis metalográfico: A y B) Secciones y microdureza de dos de los ensayos. C y D) Sección y detalle de una grieta generada en el proceso de rectificado y pulido metalográfico

evaluar la integridad metalúrgica del aporte realizado y estudiar en mayor profundidad este fenómeno de agrietamiento, se han analizado también las secciones transversales de los aportes realizados, puesto que estos han sido rectificados y el origen de las grietas podría ser este último proceso.

3.3. ANÁLISIS METALOGRÁFICO

Por último, se ha analizado la integridad metalúrgica de los recubrimientos depositados, buscando justificar el origen de las grietas encontradas durante el aporte superficial. Para ello, se han realizado unos aportes adicionales que no han sido posteriormente rectificados, con el objetivo de evaluar su calidad minimizando el post-procesado y analizar el origen de las grietas previamente detectadas.

En la Fig 5 se resume el análisis metalográfico realizado. En las dos metalografías superiores (A y B de la Fig 5) se muestran dos aportes monocapa formados por cinco cordones solapados aportados empleando las condiciones del Test 5 y que no han sido rectificados. Se incluyen, además, resultados de los perfiles de microdureza, medidos sobre dichos aportes. Se han realizado indentaciones cada 50 μm en una zona central de los aportes, y se han obtenido durezas de 65-70 HRC (992,5-1150 HV) en la zona aportada, que se reducen a aproximadamente 55 HRC (633 HV) al alcanzar la zona afectada térmicamente y el sustrato. Las altas durezas encontradas en los aportes están directamente relacionadas con la fase de refuerzo introducida, en la que se ha medido una dureza por encima de 2600 HV. Se concluye que el WC ha sido parcialmente disuelto en la matriz de AISI H13, contribuyendo al incremento de la dureza del recubrimiento de forma notable.

En lo que se refiere a la integridad de los aportes, no se han encontrado grietas con origen en el proceso de LMD. Sin embargo, en la segunda sección (B) se da un severo agrietamiento superficial, ligado al proceso de pulido metalográfico. Este agrietamiento se atribuye a una fragilización de la zona superior del recubrimiento debido a su elevada dureza (68-70 HRC, 1050-1150 HV), lo cual desemboca en el agrietamiento del mismo y en el desprendimien-

to de las partículas de WC. Como se puede apreciar en las últimas imágenes de la Fig 5 (C y D), en las probetas rectificadas se observa un fenómeno de agrietamiento similar. De esta forma se concluye que la falta de integridad superficial identificada en secciones previas no está originada por el proceso de LMD sino por el post-procesado, ya sea el rectificado o el lijado y pulido durante la preparación metalográfica. De esta forma, se ha podido demostrar la idoneidad del proceso LMD en el aporte de combinaciones de materiales para la generación de recubrimientos MMC de alta dureza, mejorando el comportamiento tribológico de las superficies en términos de dureza y coeficiente de rozamiento. Sin embargo, dado que es necesario post-procesar estas superficies, la pérdida de integridad resultante obliga a guardar un compromiso entre la dureza obtenida y la integridad superficial conseguida.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos tras el análisis de aportes monocapa constituidos por acero de herramientas de trabajo en caliente, AISI H13, y carburo de tungsteno, WC, mediante LMD. Con esto se pretende avanzar en la fabricación de recubrimientos con alta resistencia al desgaste y buen comportamiento en entornos agresivos aplicables en el sector de la estampación en caliente. El trabajo realizado contribuye a llenar el hueco encontrado en la bibliografía con respecto al estudio de esta combinación de materiales, la cual incluye una matriz de alta dureza, como es el acero de trabajo en caliente AISI H13, reforzada con partículas cerámicas de carburo de tungsteno. No obstante, los resultados podrían ser extrapolables a otros sectores de aplicación. Las principales conclusiones extraídas de este análisis son las siguientes:

- Se observa una mejora considerable de la resistencia al desgaste en todos los aportes realizados con fase de refuerzo cerámica, disminuyendo el coeficiente de fricción medido en los ensayos de *ball-on-disc* desde un valor de 0,57 en el caso

del recubrimiento de referencia de AISI H13, hasta valores de entre 0,10-0,17 en los recubrimientos reforzados con WC. Esto se debe a la gran dureza de la fase de refuerzo que, además, se diluye parcialmente en la matriz aumentando también la dureza de esta última.

- En lo que a las propiedades de dureza y resistencia al desgaste se refiere, no se han detectado mejoras significativas para concentraciones en peso de WC superiores al 17%.
- Debido a la alta dureza mencionada en el primer punto, la sensibilidad al agrietamiento de estos aportes se ve aumentada considerablemente con el incremento de la concentración de WC en el recubrimiento MMC, por lo que, durante el post-procesado de los aportes, han aparecido grietas superficiales. Por una parte, el rectificado necesario para cumplir con los requisitos de la norma ASTM G99-95a para la realización de ensayos *Ball-on-disc* conlleva un agrietamiento superficial severo. Por otra parte, se observa que la preparación metalográfica realizada también condiciona la integridad metalúrgica de las secciones analizadas. Sin embargo, no se han encontrado grietas cuyo origen sea el propio proceso de aplicación del recubrimiento, esto es, el LMD.
- Por último, se concluye que es necesario un control de la dilución de la fase de refuerzo en la matriz, asegurando la adhesión entre las partículas cerámicas y la matriz metálica, sin condicionar, en la medida de lo posible, la integridad de la misma. Dado que el mecanismo de difusión está principalmente controlado por la temperatura y el tiempo durante el cual la matriz y el refuerzo están sometidos a estas, es necesario encontrar un punto de compromiso en los parámetros de aporte, que evite el fragilización del recubrimiento MMC. Para ello, se debería controlar la temperatura de proceso y, a su vez, asegurar que el enfriamiento es lo suficientemente rápido para evitar una excesiva dilución.

REFERENCIAS

- [1] Z. Huda and P. Edi, "Materials selection in design of structures and engines of supersonic aircrafts: A review," *Mater. Des.*, vol. 46, pp. 552-560, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.10.001>.
- [2] P. D. Mangalgi, "Composite materials for aerospace applications," *Bull. Mater. Sci.*, vol. 22, no. 3, pp. 657-664, 1999, <https://doi.org/10.1007/BF02749982>.
- [3] C. Chen, Y. Wang, H. Ou, Y. He, and X. Tang, "A review on remanufacture of dies and moulds," *J. Clean. Prod.*, vol. 64, pp. 13-23, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.014>.
- [4] S. J. Zinkle and G. S. Was, "Materials challenges in nuclear energy," *Acta Mater.*, vol. 61, no. 3, pp. 735-758, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.11.004>.
- [5] D. B. Miracle, "Metal matrix composites - From science to technological significance," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 65, no. 15-16 SPEC. ISS., pp. 2526-2540, 2005, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.05.027>.
- [6] H. Lu, X. Wang, T. Zhang, Z. Cheng, and Q. Fang, "Design, fabrication, and properties of high damping metal matrix composites-A review," *Materials (Basel)*, vol. 2, no. 3, pp. 958-977, 2009, <https://doi.org/10.3390/ma2030958>.
- [7] I. A. Ibrahim, F. A. Mohamed, and E. J. Lavernia, "Particulate reinforced metal matrix composites - a review," *J. Mater. Sci.*, vol. 26, no. 5, pp. 1137-1156, 1991, <https://doi.org/10.1007/BF00544448>.
- [8] A. Evans, C. San Marchi, and A. Mortensen, *Metal Matrix Composites in Industry: An Introduction and a Survey*. 2003, <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0405-4>.
- [9] K. K. Chawla, "Metal Matrix Composites," in *Materials Science and Technology*, 2006, <http://doi.org/10.1007/978-1-4614-9548-2>.
- [10] F. Brueckner et al., "Enhanced manufacturing possibilities using multi-materials in laser metal deposition," *J. Laser Appl.*, vol. 30, no. 3, 2018, <https://doi.org/10.2351/1.5040639>.
- [11] D. B. Miracle and S. L. Donaldson, "Introduction to composites," in *ASM Handbook, Volume 21: Composites*, vol. 21, 2001, pp. 3-18, <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v21.a0003350>.
- [12] R. Singh and J. Fitz-Gerald, "Surface composites: A new class of engineered materials," *J. Mater. Res.*, vol. 12, no. 3, pp. 769-773, 1997, <https://doi.org/10.1557/JMR.1997.0112>.
- [13] D. Embury and O. Bouaziz, *Steel-Based Composites: Driving Forces and Classifications*,

In: *Annual Review of Materials Research*, vol. 40, no. 1, 2010, <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070909-104438>.

- [14] Z. Zhang and R. Kovacevic, "Laser cladding of iron-based erosion resistant metal matrix composites," *J. Manuf. Process.*, vol. 38, no. January, pp. 63-75, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.01.001>.
- [15] M. P. Behera, T. Dougherty, and S. Singamneni, "Conventional and additive manufacturing with metal matrix composites: A perspective," *Procedia Manuf.*, vol. 30, pp. 159-166, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.023>.
- [16] M. Rosso, "Ceramic and metal matrix composites: Routes and properties," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 175, no. 1-3, pp. 364-375, 2006, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.04.038>.
- [17] D. Novichenko, A. Marants, L. Thivillon, P. Bertrand, and I. Smurov, "Metal matrix composite material by direct metal deposition," *Phys. Procedia*, vol. 12, no. PART 1, pp. 296-302, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.038>.
- [18] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. O. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Compos. Part B Eng.*, vol. 143, no. February, pp. 172-196, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.
- [19] S. Kaierle, A. Barro, C. Noelle, J. Hermsdorf, L. Overmeyer, and H. Haferkamp, "Review on Laser Deposition Welding: From Micro to Macro," *Phys. Procedia*, vol. 39, pp. 336-345, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.10.046>.
- [20] P. Kattire, S. Paul, R. Singh, and W. Yan, "Experimental characterization of laser cladding of CPM 9V on H13 tool steel for die repair applications," *J. Manuf. Process.*, vol. 20, pp. 492-499, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.06.018>.
- [21] W. Jiang and P. Molian, "Nanocrystalline TiC powder alloying and glazing of H13 steel using a CO2 laser for improved life of die-casting dies," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 135, no. 2-3, pp. 139-149, 2001, [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)01075-6](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)01075-6).
- [22] D. Janicki, J. Górka, and A. Kotarska, "Laser cladding of Inconel 625-based composite coatings," *Weld. Technol. Rev.*, vol. 90, no. 9, pp. 6-11, 2018, <https://doi.org/10.26628/wtr.v90i9.946>.
- [23] J. Przybyłowicz and J. Kusiński, "Structure of laser clad tungsten carbide composite coatings," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 109, no. 1-2, pp. 154-160, 2001, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00790-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00790-1).
- [24] B. L. Ezquerro, L. Lozada, H. van den Berg, M. Wolf, and J. M. Sánchez, "Comparison of the thermal shock resistance of WC based cemented carbides with Co and Co-Ni-Cr based binders," *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 72, no. September 2017, pp. 89-96, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.jirmhm.2017.12.021>.
- [25] J. Nurminen, J. Näkki, and P. Vuoristo, "Microstructure and properties of hard and wear resistant MMC coatings deposited by laser cladding," *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 27, no. 2, pp. 472-478, 2009, <https://doi.org/10.1016/j.jirmhm.2008.10.008>.
- [26] M. R. Fernández, A. García, J. M. Cueto, R. González, A. Noriega, and M. Cadenas, "Effect of actual WC content on the reciprocating wear of a laser cladding NiCrBSi alloy reinforced with WC," *Wear*, vol. 324-325, pp. 80-89, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.12.021>.
- [27] G. Wang, J. Zhang, R. Shu, and S. Yang, "High temperature wear resistance and thermal fatigue behavior of Stellite-6/WC coatings produced by laser cladding with Co-coated WC powder," *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 81, no. February, pp. 63-70, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.jirmhm.2019.02.024>.
- [28] W. H. Jiang and R. Kovacevic, "Laser deposited TiC/H13 tool steel composite coatings and their erosion resistance," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 186, no. 1-3, pp. 331-338, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.12.053>.
- [29] S. T. Gu, G. Z. Chai, H. P. Wu, and Y. M. Bao, "Characterization of local mechanical properties of laser-cladding H13-TiC composite coatings using nanoindentation and finite element analysis," *Mater. Des.*, vol. 39, pp. 72-80, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.02.028>.
- [30] B. Norhafzan, S. N. Aqida, E. Chikarakara, and D. Brabazon, "Surface modification of AISI H13 tool steel by laser cladding with NiTi powder," *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 122, no. 4, pp. 1-6, 2016, <https://doi.org/10.1007/s00339-016-9937-6>.
- [31] *Flame Spray Technologies, "AISI H13 (DIN 1.2344) Datasheet," 2019.*
- [32] *Kind Et Co Edelstahlwerk, "CR7V-L Datasheet," 2019.*
- [33] *Sulzer Metco Europe GmbH, "Inspection Certificate of MetcoClad 52001," 2013.*
- [34] X. Lu, Y. F. Zhou, X. L. Xing, B. Wang, Q. X. Yang, and S. Y. Gao, "Surface additive manufacturing of Ni-based superalloy/H13 steel system by laser depositing: Microstructure, microhardness and flexural response," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 337, no. January, pp. 525-535, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.01.071>.
- [35] W. Conshohocken, "G99 - 95a. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus," 2000.
- [36] M. Erfanmanesh, R. Shoja-Razavi, H. Abdollah-Pour, H. Mohammadian-Semnani, M. Baretak, and S. H. Hashemi, "Friction and wear behavior of laser clad WC-Co and Ni/WC-Co deposits at high temperature," *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 81, no. December 2018, pp. 137-148, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.jirmhm.2019.02.025>.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado en el contexto del proyecto "Cooperación científica en fabricación aditiva para un control robusto de la cadena de valor" - ADDISEND (KK-2018/00115), financiado por el Dpto. de Desarrollo Económico e Infraestructuras del Gobierno Vasco.