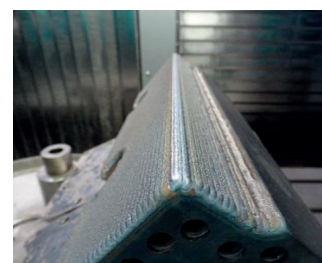


Uso de luz estructurada para la fabricación de un recubrimiento de un taco de estampación en caliente mediante la tecnología híbrida



Use of the structured light for the manufacturing of a coating on a hot stamping die by hybrid manufacturing



Mikel Ortiz-Edesa¹, Nerea Alberdi-Olaizola¹, Rakel Pacheco-Goñi¹, Amaia Alberdi-Gurrutxaga¹, Pedro Ramiro-Castro¹, Aitzol Lamikiz-Mentxaka², Arrate Olaiz-Artola³ e Ines Aseguinolaza-Otegui⁴

¹ Fundación Tecnalia Research And Innovation, División de Industria y Transporte, Área de Fabricación Avanzada, Paseo Mikeletegi, 7- 20009 San Sebastián (España).

² Universidad del País Vasco (UPV/EHU). Dpto. de Ingeniería Mecánica. Plaza Ingeniero Torres Quevedo, 1 - 48013 Bilbao (España).

³ Ibarria Innovatek. Pol. Ind. Etxesaga s/n, 20720 Azkoitia, Guipuzkoa (España).

⁴ Batz s. Coop. Barrio Torrea, 2 - 48140 Igorre, Vizcaya (España).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9381> | Recibido: 11/09/2019 • Inicio Evaluación: 11/09/2019 • Aceptado: 19/12/2019

ABSTRACT

• With the development of the new concept of hybrid machine, which combines additive and subtractive manufacturing in the same machine, new opportunities for automation of applications such as the repairing of defective parts or the addition of coatings with specific properties are coming out. In these applications, the need for the use of measurement systems has been revealed, in order to know the real geometry of the parts. Among the different measurement systems, the structured light technology presents many advantages for this process: it is capable of measuring parts of different sizes and with low texture in a single capture, and additionally, the lighting conditions don't affect to the measurement due to the camera has its own light source. In this article, different applications of structured light technology for hybrid manufacturing are presented.

In addition, an example of the application of this technology is also described, which consists in the manufacturing of the coating of a hot stamping die. For this, the ZVH 45/1600 Add+Process hybrid machine from Ibarria manufacturer has been employed.

• **Keywords:** 3D measurement, Structured light, Hybrid manufacturing, Hybrid machine, Laser Cladding, Coating, Automation, Hot stamping die.

Además, se describe un ejemplo de la aplicación de esta tecnología, que consiste en la fabricación del recubrimiento de un taco de estampación en caliente. Para ello, se ha empleado la máquina híbrida ZVH 45/1600 Add + Process de Ibarria.

Palabras clave: Medición 3D, Luz estructurada, Fabricación híbrida, Máquina híbrida, Laser Cladding, Recubrimiento, Automatización, Taco de estampación en caliente.

1. INTRODUCCIÓN

La fabricación exitosa de piezas en cualquier máquina depende de la precisión en la localización, posicionamiento y control de la geometría de la pieza [1]. La práctica industrial revela que más de la mitad del tiempo se invierte en la programación de la máquina, en el posicionamiento y fijación de la pieza y en el control de la calidad de la misma. Tradicionalmente, la localización de la pieza se realiza o bien diseñando un accesorio específico sobre el que fijar la pieza para asegurar la ubicación y orientación de las piezas en la máquina (normalmente en producciones de series largas y pocas referencias), o montando la pieza manualmente en un sistema de fijación más general, midiendo la posición y orientación de una serie de puntos clave (series cortas). Ambos enfoques tienen inconvenientes. En el caso de los utillajes a medida se invierte mucho tiempo en el diseño y aumenta el coste frente a utilizar un utillaje genérico para todas las piezas. Sin embargo, en el caso de este último, pese a que actualmente existen algunas soluciones comerciales que aumentan la flexibilidad de este tipo de sistemas para adaptarlos a la geometría de la pieza a mecanizar [2-3], generalmente es necesario que los operadores sean expertos y además se necesita un tiempo considerable para fijar cada pieza.

La solución a estos problemas es la integración de sistemas de medición y/o localización automática en las herramientas de la propia máquina. Estos sistemas deben ser capaces de medir ambos, la localización y la forma de la pieza, tal y como ha sido montada y fabricada en la máquina, sin necesidad de fabricar accesorios de fijación a medida y permitiendo colocar la pieza sin tanta exactitud.

Actualmente, el sistema de percepción más utilizado es el touch probe o los palpadores [4-6], que pueden medir por contacto directo, la posición y formas de las superficies en el espacio

RESUMEN

Con el desarrollo del nuevo concepto de máquina híbrida, que combina la fabricación aditiva y sustractiva en la misma máquina, están surgiendo nuevas oportunidades para la automatización de aplicaciones como la reparación de piezas defectuosas o la adición de recubrimientos con propiedades específicas. En estas aplicaciones, se ha detectado la necesidad de utilizar sistemas de medición para conocer la geometría real de las piezas. Entre los diferentes sistemas de medición, la tecnología de luz estructurada presenta muchas ventajas para este proceso: es capaz de medir, con una única captura, piezas de diferentes tamaños y con poca textura, y, además, al incorporar su propia fuente de luz no se ve afectada por las condiciones de iluminación. En este artículo, se presentan diferentes aplicaciones de la tecnología de luz estructurada para la fabricación híbrida.

de la máquina con precisión. Existen muchos ejemplos de sistemas basados en palpador integrados en máquina [7-8]. Sin embargo, el uso de estos sistemas no es adecuado cuando la pieza presenta superficies no accesibles debido a las dimensiones del palpador o por presentar oclusiones. Además, todavía no está claro si la precisión del palpador puede verse afectada por las características de rugosidad de la superficie.

Como alternativa a los palpadores de medición por contacto directo, los sistemas ópticos 3D, familia de tecnologías que capturan datos tridimensionales de superficies, son capaces de disponer de alta densidad de la superficie de la pieza en una sola captura [9-10]. Con la información 3D obtenida por el escáner 3D se crea un modelo real de la pieza, tal y como se ha fabricado y montado en la máquina, para dirigir el proceso de localización y planificación de trayectorias basándose en la pieza real en lugar del modelo teórico. Destacan los escáneres de luz estructurada que son sistemas que proyectan patrones de luz codificados conocidos y generan una nube de puntos densa [11].

En la actualidad, no es común encontrar máquinas integradas con sistemas de escaneado 3D, pero debido a las ventajas que presentan (bajo precio, rapidez y flexibilidad), se sitúan como la opción más adecuada para conseguir el objetivo de automatizar el proceso de localización, posicionamiento y control de la geometría de la pieza [12]. Integrar un sistema de percepción 3D de estas características permite, además, la generación automática de trayectorias sobre la pieza real escaneada [13], la inspección de las piezas fabricadas [14] y la identificación y localización de zonas desgastadas en piezas para su posterior reparación [15].

En este contexto, además, con el desarrollo del nuevo concepto de máquina híbrida, como es el caso de la ZVH Add+Process de Ibarmia que combina la fabricación aditiva por LMD (Laser Metal Deposition) y sustractiva en la misma máquina, están surgiendo nuevas oportunidades para la automatización de diferentes aplicaciones. Es el caso de la reparación de piezas defectuosas o la adición de recubrimientos con propiedades específicas, con la principal ventaja de no tener que mover la pieza entre diferentes máquinas para realizar los diferentes procesos de fabricación (LMD y mecanizado), que puede ser costoso, especialmente en piezas de gran tamaño. En este tipo de aplicaciones, se ha detectado la necesidad de utilizar sistemas de medición para conocer la geometría real tanto del sustrato, donde se desea aportar el material, así como del material aportado por LMD. Por lo tanto, para el desarrollo del concepto de máquinas híbridas, es necesario integrar los sistemas de medición en la máquina híbrida. Esta integración también puede contribuir a la automatización completa del proceso de posicionamiento y control de la pieza. En este sentido, la tecnología de luz estructurada presenta un gran potencial para este proceso, ya que ofrece ventajas como la capacidad de medir piezas de diferentes tamaños y con poca textura en una sola captura, y, además, al incorporar su propia fuente de luz no se ve afectada por las condiciones de iluminación.

En este trabajo, por un lado, se describe la tecnología de medición 3D por luz estructurada y sus principales aplicaciones en el campo de la fabricación híbrida. Entre ellas, cabe destacar la inspección geométrica de piezas fabricadas por LMD, la identificación o localización de defectos o la reconstrucción de modelos digitales de piezas sobre las que se deben realizar operaciones de aporte. Por otro lado, a modo de ejemplo, se introduce un caso de uso específico de dicha tecnología en fabricación híbrida. En concreto, se define una metodología que combina operaciones de LMD y mecanizado, para la obtención de recubrimientos de altas prestaciones mecánicas sobre tacos de estampación en caliente

mediante el uso de la tecnología de luz estructurada. Este tipo de recubrimientos está dirigido a aumentar de manera significativa la vida útil de los tacos.

Por último, se propone una metodología para la automatización de la fabricación híbrida.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. DESCRIPCIÓN Y APLICACIONES DE LA TECNOLOGÍA DE MEDICIÓN 3D POR LUZ ESTRUCTURADA EN FABRICACIÓN HÍBRIDA

La tecnología de luz estructurada forma parte de la familia de sistemas ópticos 3D que responden al enfoque de triangulación activa. Estos sistemas difieren en la naturaleza y forma del patrón de luz proyectado, que puede tomar la forma de un solo punto de luz láser, una línea láser, o un patrón o serie de patrones más complejo producido por un sistema de proyección de vídeo [16-19]. A diferencia de otros sistemas de triangulación activa, como los sistemas basados en líneas láser, que precisan barridos sincronizados del haz de láser, los sistemas de luz estructurada proyectan patrones bidimensionales de luz y los analizan para obtener la información 3D de cada punto simultáneamente sin necesidad de movimiento.

Los sensores de luz estructurada trabajan proyectando una serie de patrones de luz codificados y conocidos sobre la escena a reconstruir. El proyector de patrones se monta desplazado respecto a una cámara que mediante triangulación calcula la posición y forma de los puntos de la superficie del campo de visión. Cuando el patrón colisiona con los objetos de la escena se produce una deformación del patrón. Midiendo la deformación del patrón de luz en la escena, se puede recuperar fácilmente la información de profundidad de los objetos. De esta manera, se genera una nube de puntos 3D densa con la geometría del objeto y se obtiene la localización de la escena en coordenadas del sistema.

Existen diferentes fabricantes de sistemas basados en la tecnología de luz estructurada, con soluciones comerciales cerradas que generan la nube de puntos y están diseñadas para diferentes dimensiones de objetos, diferentes distancias de trabajo y resoluciones [20-23]. Los parámetros más importantes para seleccionar un sistema de luz estructurada son, la dimensión de las piezas a reconstruir (a mayor área de reconstrucción, menor es la resolución del escáner), las características de la superficie a reconstruir, y la resolución en profundidad requerida [24]. Es necesario definir un compromiso entre la resolución en profundidad (para garantizar la tolerancia requerida) y el tiempo de ciclo. Como ejemplo, para el caso de una pieza de 240 mm de longitud, midiendo a una distancia de un metro, esta tecnología es capaz de identificar defectos de 0,3 mm de tamaño.

En el caso concreto de la fabricación híbrida que combina operaciones de LMD y mecanizado, se han identificado principalmente las siguientes aplicaciones de uso para los sistemas de luz estructurada:

2.1.1. Inspección geométrica de pieza fabricada por LMD

Cuando se fabrica una pieza por LMD, no se conoce la geometría real obtenida. La tecnología de luz estructurada se puede emplear para reconstruir la geometría real obtenida por LMD y compararla con el diseño CAD teórico, identificando desviaciones. Estas desviaciones se pueden corregir posteriormente añadiendo más material y/o eliminando material mediante procesos de mecanizado. Las desviaciones identificadas pueden servir también

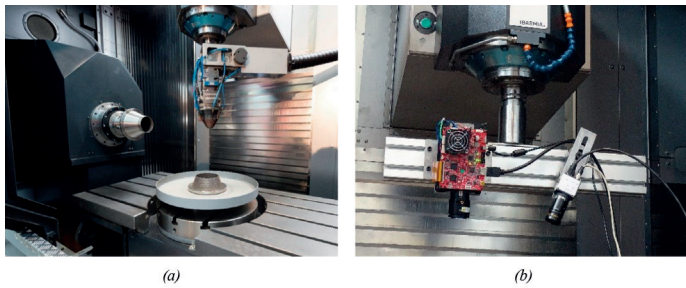


Fig. 1: a) IBARMIA ZVH45/1600 Add+Process; b) Integración del Sistema de visión 3D en la máquina

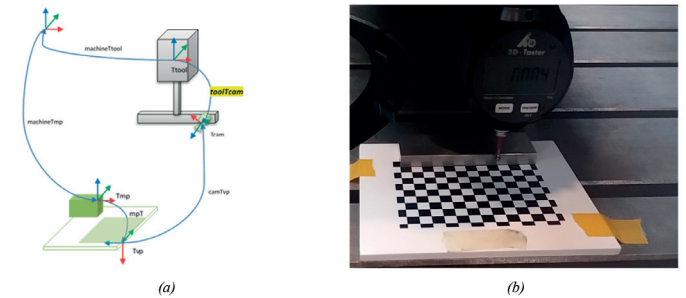


Fig. 2: a) Esquema de sistema de referencia equipo de visión-máquina; b) Medición de las caras de la cala patrón

para desarrollar un control adaptativo de altura para procesos de fabricación aditiva [25-26].

2.1.2. Identificación y localización de defectos

En aplicaciones de reparación, identificar y localizar los defectos a reparar en la pieza original es de suma importancia, con el objetivo de añadir material en la zona dañada [15]. Mediante sistemas de luz estructurada, es posible reconstruir digitalmente la pieza dañada y compararla con el modelo original, para identificar así la presencia o no de defectos. Además, en caso de detectarse defectos, es posible concretar en qué zona de la pieza están localizados.

2.1.3. Reconstrucción de modelo digital de pieza sobre la que se debe realizar operaciones de aporte

En algunos casos, en el campo de la fabricación aditiva, la geometría base sobre la que se debe realizar un aporte no es conocida. Por ejemplo, en la fabricación de moldes y matrices, el diseño de estos puede variar a lo largo del tiempo y es habitual que el diseño CAD no se actualice, y, por lo tanto, no se disponga de un modelo digital. Si en este tipo de piezas se desea, por ejemplo, añadir material para realizar alguna modificación o reparación o incluso para crear un recubrimiento con propiedades especiales, estas tareas se suelen realizar a mano. Para realizar este proceso de manera automática, es necesario conocer la geometría exacta de la pieza, la cual, se puede reconstruir (modelo digital) mediante la tecnología de luz estructurada [27]. A su vez, este modelo se puede importar en un software CAM, donde se puede tomar como referencia para programar trayectorias de aditivo y/o mecanizado.

El empleo de la tecnología de luz estructurada que se describe en el apartado 3 de este trabajo, es un ejemplo claro de este tipo de aplicación. En concreto, el presente trabajo se centra en la obtención de recubrimientos de altas prestaciones mecánicas sobre tacos de estampación en caliente, una aplicación dirigida a aumentar de manera considerable la vida útil de los tacos.

2.2. INTEGRACIÓN DE SISTEMA DE LUZ ESTRUCTURADA EN MÁQUINA

2.2.1. Máquina híbrida ZVH 45/1600 Add&Process de Ibarmia

El trabajo que se presenta en este artículo se ha desarrollado en la máquina híbrida IBARMIA ZVH45/1600 Add+process (Fig. 1-a). Esta máquina multiproceso combina la tecnología LMD con la capacidad de fresado en 5 ejes y torneado (vertical y horizontal). Está equipada con un cabezal de Precitec YC52LMD con boquilla coaxial discreta de 4 vías, un alimentador de polvo Sulzer Metco TWIN-10-C y un generador laser Rofin FLO30 de 3 kW con una longitud de onda de 1,07 μm .

2.2.2. Integración, calibración y validación del sistema de luz estructurada en el entorno de la máquina

El sistema de luz estructurada empleado en este trabajo está compuesto por una cámara de visión (uEye UI-3360CP) y un proyector led (TI, Texas Instruments) acoplados ambos a un soporte para su integración en máquina (Fig. 1-b). Se trata de un prototipo flexible y reconfigurable diseñado a tal efecto. Las mediciones realizadas se han procesado mediante el software DAVID SL transformando las nubes de puntos registradas en mallas sobre las que poder programar posteriormente las trayectorias LMD y de mecanizado.

En primer lugar, se ha acoplado el prototipo descrito anteriormente al cabezal de la máquina híbrida (Fig. 1-a). Este prototipo permite variar tanto la distancia entre cámara y proyector como el ángulo de la cámara, permitiendo así medir piezas de diferente tamaño, así como trabajar a resoluciones y distancias diferentes.

Tras la integración, se ha trabajado en la calibración del sistema para establecer la relación entre el control de la máquina y el sistema óptico. El objetivo de la calibración ha sido desarrollar un algoritmo que transforme en coordenadas máquina (machineTool en Fig. 2-a) las coordenadas de la pieza obtenidas con el sistema óptico (toolTcam en Fig. 2-a), y de esta manera saber la posición real de la pieza dentro de la máquina. Para ello, se ha utilizado un patrón de calibración tipo chessboard (Fig. 2-b), y teniendo en cuenta las direcciones de los ejes de la máquina, que son conocidas, se ha establecido la relación entre el sistema de visión y las coordenadas máquina. Este procedimiento consiste en una conversión del sistema de referencia, mediante el uso de matrices de cambio de base.

Finalmente, se han realizado pruebas para validar la calibración previa. Para ello, mediante el uso del sistema de visión y siguiendo el procedimiento mencionado, se ha calculado la posición de un punto del patrón de calibración en coordenadas máquina. Una vez calculada su posición, se ha colocado en el cabezal de la máquina una herramienta especial de punta, y a la máquina se le ha dado la orden de ir a esta posición tal y como se muestra en la siguiente imagen. Este procedimiento se ha llevado a cabo en

diferentes posiciones y configuraciones, para garantizar que las mediciones sean adecuadas.

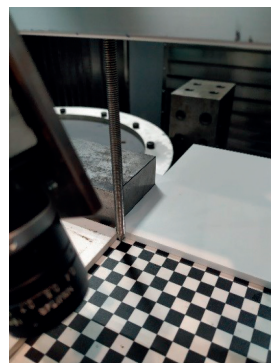


Fig. 3: Validación del proceso de calibración en un punto del patrón

3. RESULTADOS

3.1. RECUBRIMIENTO DE UN TACO DE ESTAMPACIÓN EN CALIENTE

En este apartado, se presenta una metodología de fabricación híbrida (LMD + Mecanizado) para la obtención de recubrimientos

de altas prestaciones mecánicas sobre tacos de estampación en caliente mediante el uso de la tecnología de luz estructurada. El trabajo se ha realizado sobre un taco de CR7V-L del fabricante BATZ, en el que se desea fabricar un recubrimiento de AISI H13 de 1,5 mm de espesor. En la Fig. 4-a se muestra el taco de estudio donde se especifica, en azul, las superficies sobre las que se desea realizar el recubrimiento.

3.1.1. Ajuste de parámetros

En primer lugar, se han establecido los parámetros adecuados de aporte por LMD y mecanizado, mediante pruebas en placas planas.

El material base utilizado ha sido la aleación CR7V-L de Kind & Co. Se trata de un acero cromado especial habitualmente empleado en aplicaciones de trabajo en caliente como, por ejemplo, matrices para conformado en caliente de piezas estructurales de automoción. Se caracteriza por poseer una excelente resistencia a alta temperaturas y resistencia al desgaste, además de buena resistencia a fatiga térmica.

El material seleccionado para realizar el recubrimiento ha sido la aleación de acero AISI H13 (DIN 1.2344) del suministrador FST. Se trata de una aleación (Cr-Mo-V) de acero de herramienta con alto nivel de resistencia al choque y fatiga térmica y buena resistencia a la temperatura. Por lo tanto, estas propiedades hacen del AISI H13 un material particularmente valioso para emplear en herramientas de estampación.

La Tabla 1 muestra la composición química tanto del material base como del material seleccionado para realizar el recubrimiento.

Con el objetivo de definir las condiciones de aporte adecuadas para obtener un recubrimiento efectivo de 1,5 mm de espesor sobre el taco de estampación de BATZ, se ha llevado a cabo una serie de experimentos que ha consistido en realizar recubrimientos de AISI H13 sobre placa plana de CR7V-L empleando diferentes combinaciones de potencia láser, velocidad de avance y flujo de polvo. La combinación de parámetros seleccionada, para posteriormente realizar el recubrimiento sobre el taco de estampación, ha sido la que, además de generar un espesor de recubrimiento efectivo aceptable (>1,5 mm), ha conducido a la obtención de una tasa de aporte o MDR (Material Deposition Rate) y tasa de eficiencia de polvo más elevadas (potencia láser de 2.500 W, velocidad de avance de 400 mm/min, y flujo de polvo de 17,6 g/min). Con esta combinación de parámetros, se obtiene un MDR de 0,61 kg/h, y una tasa de eficiencia de polvo del 58 %.

Además, el recubrimiento obtenido se ha mecanizado para analizar la calidad del aporte. En este sentido, se ha verificado con un calibrador de alturas digital que se obtiene un espesor de capa final adecuado (1,5 mm después de mecanizar) sin presencia superficial de poros o faltas de fusión.

3.1.2. Posicionamiento y reconstrucción 3D del taco en estado inicial

Para la reconstrucción 3D de la pieza, se ha colocado el taco en la máquina en la posición y con la orientación en la que se realiza el recubrimiento. Esta configuración de pieza en máquina se determina con base en un análisis de limitaciones cinemáticas de la máquina. El objetivo es que el cabezal pueda recubrir todas las superficies deseadas sin necesidad de mover el taco. En este caso,

Material	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	P	Fe
CR7V-L	0.42	0.50	0.40	6.50	1.30	0.80	-	-	Bal.
AISI H13	0.41	0.80	0.25	5.12	1.33	1.13	-	0.01	Bal.

Tabla 1: Composición química de material base y material de recubrimiento

debido a la limitación del eje B a $\pm 45^\circ$, el taco se ha colocado en una posición inclinada. De esta forma, las 2 superficies principales a recubrir quedan orientadas a $\pm 45^\circ$ de la mesa de la máquina aproximadamente, y, por lo tanto, se asegura que el cabezal de aporte LMD pueda posicionarse en una posición perpendicular respecto a la superficie.

Posteriormente, se ha reconstruido el taco digitalmente con el equipo de luz estructurada. De esta manera, además de obtener el modelo digital del taco, se determina su posición real en el entorno de la máquina (Fig. 4-b).

La reconstrucción de la pieza se ha comparado con la geometría teórica de la pieza (CAD de Fig. 4-a), y se ha observado una desviación de 1,32 mm de media en una de las caras del taco (Fig. 4-c). Este hecho confirma, como se detallaba en el apartado 2.1.3, la necesidad de reconstruir digitalmente el taco real sobre el que se debe realizar el recubrimiento pese a disponer del modelo teórico inicial y pone de relieve la utilidad del sistema de luz estructurada en este sentido.

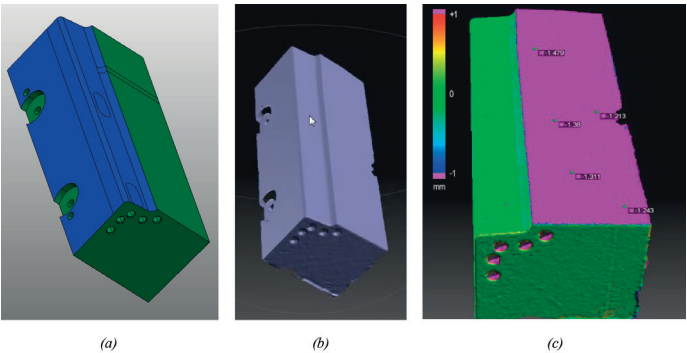


Fig. 4: a) Modelo teórico (CAD) del taco de estampación en caliente de BATZ; b) Reconstrucción digital del taco real en máquina mediante luz estructurada; c) Comparativa entre el modelo teórico y el real

3.1.3. Programación de trayectorias de recubrimiento

El modelo digital del taco se ha importado en el software CAM Autodesk PowerMill de Bezzier, donde se ha utilizado como referencia para generar las trayectorias de aporte sobre las zonas deseadas.

El recubrimiento se ha programado en 4 secuencias diferentes como se muestra en la Fig. 5 a. En todos los casos se ha utilizado el mismo paso lateral, el cual define el solapamiento entre cordones. La programación se ha realizado de tal manera que la herramienta avanza perpendicularmente a la superficie en todas las zonas.

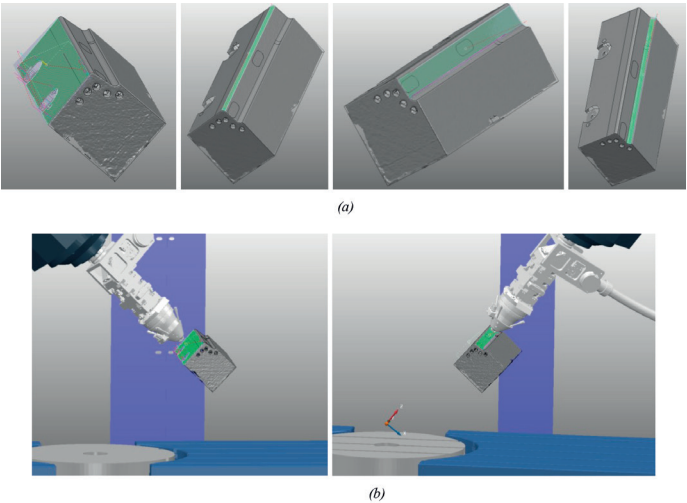


Fig. 5: Programación de trayectorias de aporte en PowerMill: a) Secuencias de aporte programadas y b) Simulación del aporte programado

Posteriormente, se han simulado las trayectorias programadas para verificar la correcta ejecución de las mismas, y para comprobar que no ocurren colisiones (Fig. 5 b).

3.1.4. Aporte de recubrimiento de AISI H13 por LMD

Las trayectorias programadas en PowerMill, se han ejecutado directamente en la máquina sobre el taco empleando los parámetros definidos previamente en placa plana, obteniendo así el taco con el recubrimiento de alta dureza (Fig. 6).

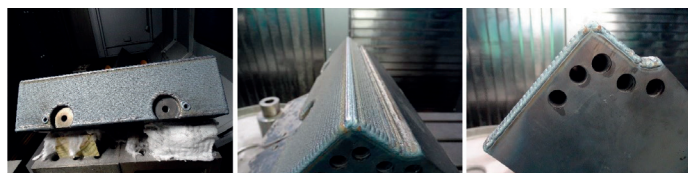


Fig. 6: Recubrimiento de AISI H13 sobre taco de CR7V-L

3.1.5. Reconstrucción 3D del recubrimiento y comparativa con taco en estado inicial

El recubrimiento realizado se reconstruye en máquina con el equipo de luz estructurada para obtener su modelo digital (ver Fig. 7).

Este modelo se compara con el modelo digital del taco inicial sin recubrimiento para determinar la cantidad (espesor) de material aportado mediante LMD y la necesidad o no de realizar aporte de material adicional para alcanzar en toda la superficie objetivo un recubrimiento mayor de 1,5 mm. De esta manera, se cuantifica también la cantidad de material que se debe eliminar (mecanizar) posteriormente para alcanzar el espesor del recubrimiento objetivo, es decir, 1,5 mm.

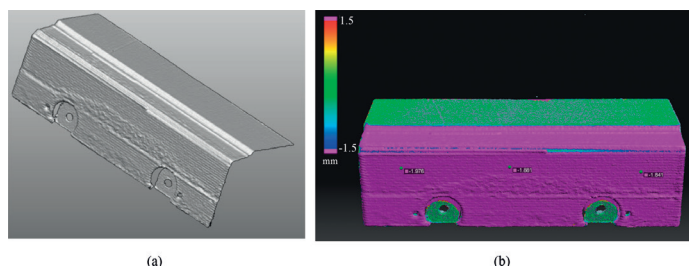


Fig. 7: a) Reconstrucción digital de recubrimiento de AISI H13 sobre taco de CR7V-L; b) Comparativa con modelo digital real del taco en estado inicial

3.1.6. Mecanizado del recubrimiento hasta espesor objetivo

Finalmente, con la medición del recubrimiento realizado, se han programado las trayectorias de mecanizado y se ha mecanizado la pieza hasta obtener un espesor de recubrimiento de 1,5 mm (Fig. 8).



Fig. 8: Taco mecanizado hasta espesor efectivo de 1,5 mm

3.2. METODOLOGÍA PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE LA FABRICACIÓN HÍBRIDA

En el apartado anterior, se ha aplicado el sistema de visión 3D para la medición en máquina de la geometría de un taco de

estampación en caliente, con lo que se ha validado el concepto de medición en máquina. Para la industrialización de esta solución y la integración de la etapa de medición en el concepto de máquina híbrida, se debe automatizar este proceso de medición. Para ello, se propone la metodología que se representa de manera esquemática en la Fig. 9 y que se describe a continuación:

1. Medición de la pieza de partida fuera de máquina, y reconstrucción del modelo digital de la pieza (CAD).
2. Programación de trayectorias de LMD y de mecanizado en un software CAM, tomando como referencia el modelo digital reconstruido en la etapa anterior, y posicionando la pieza en una posición deseada y teórica de la máquina en el entorno del software.
3. Posicionamiento real de la pieza en máquina en la posición deseada.
4. Medición en la posición real de la pieza en máquina, mediante el sistema de luz estructurada.
5. Ajuste automático de las trayectorias LMD programadas en la etapa 2, a la posición real de pieza.
6. Ejecución de las trayectorias LMD ajustadas a la posición real.
7. Medición del aporte realizado mediante el sistema de luz estructurada y comparativa con el CAD para cuantificar la cantidad de material (espesor del recubrimiento) aportada.
8. Ajuste automático de las trayectorias de mecanizado programadas en la etapa 2, teniendo en cuenta la medición del aporte realizado.
9. Ejecución del proceso de mecanizado.
10. Medición y verificación final de pieza. La pieza final se reconstruye digitalmente mediante el sistema de luz estructurada y se compara con la reconstrucción de la pieza antes del aporte para verificar que el espesor de recubrimiento final después del mecanizado es el deseado.

Una de las ventajas de la metodología propuesta es que las etapas 1 y 2 se realizan fuera de la máquina por lo que esta, no está ocupada por la pieza, lo que permite aumentar su productividad. Por otro lado, a partir de la etapa 3, la fabricación híbrida se realiza de forma automática en el entorno de la máquina donde el sistema de luz estructurada estaría previamente integrado, calibrado y validado. Esta integración contribuye, por lo tanto, a la automatización completa del proceso de posicionamiento y control de la pieza y permite reducir considerablemente los tiempos de proceso respecto a métodos de fabricación convencionales ya que entre las diferentes etapas de la fabricación híbrida (LMD y mecanizado) no es necesario mover la pieza. Además, el tiempo de medición empleado por el sistema de luz estructurada en cada caso se reduce a unos pocos segundos al permitir medir la pieza en una sola captura.

4. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

En este trabajo se ha presentado la integración y calibración de un sistema de visión 3D basado en la tecnología de luz estructurada en una máquina híbrida del fabricante Ibarria que combina el proceso LMD con el mecanizado. Esta integración, permite la medición y la localización de piezas en máquina. Como aplicación de esta integración, se ha propuesto la fabricación de un recubrimiento de altas prestaciones en un taco de estampación en caliente, dirigida a aumentar la vida útil de los tacos. Este sistema, ha permitido medir la geometría exacta del taco de estampación, para poder así generar unas trayectorias de aporte de material que se ajusten a la geometría real de la pieza, y, por lo tanto, poder fabricar un aporte sin defectos. Este trabajo propone como línea

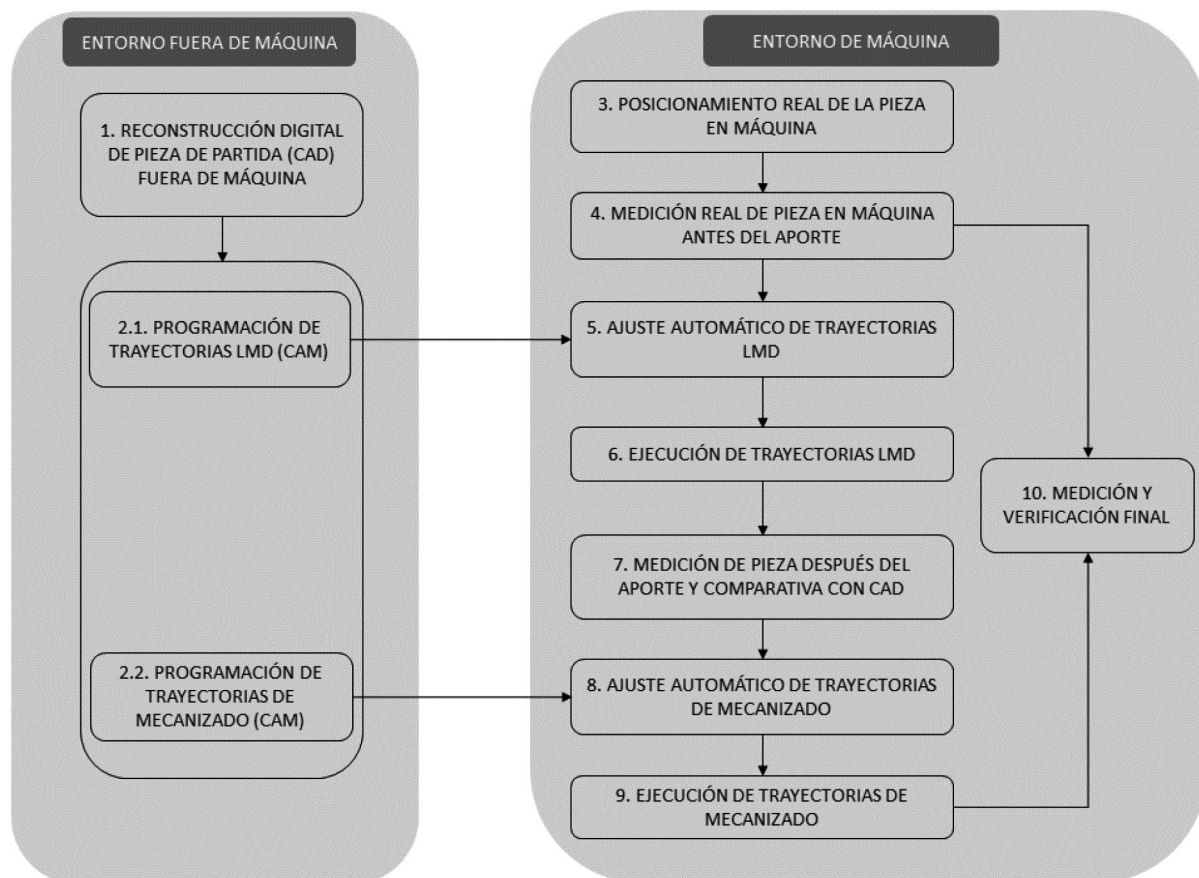


Fig. 9: Representación esquemática de la metodología para la automatización de la fabricación híbrida

futura la automatización de la etapa de medición mediante la metodología que se propone en el apartado 3.2 de este artículo que permite aumentar la productividad de la máquina empleada, así como la reducción del tiempo del proceso de fabricación híbrida. Además de esta metodología, también se deben desarrollar sistemas de visión que sean capaces de trabajar como una herramienta adicional en los centros de mecanizado.

REFERENCIAS

- [1] Cerrillo, I., Rodríguez, A., Urbikain, G. et al. (2016). Nuevas tecnologías de fijación y posicionamiento. El mecanizado de grandes piezas en Argentina. Interempresas-Metalmecánica, 43. DOI: 10.13140/RG.2.1.4968.8561
- [2] Beckman, L. (2014). Clamping System Reduces Machining Time and Setup. Production Machining. Disponible en: <https://www.productionmachining.com/articles/clamping-system-reduces-machining-time-and-setup> (Dic 2019).
- [3] Quick-Point zero-point clamping system. LANG Technovation. Disponible en: <http://www.lang-technovation.com/en/zero-point-clamping-system.html> (Dic 2019).
- [4] McMurtry, D.R. (1979). Contact-sensing probe, U.S. Classification: US4301338A. International Classification: G01B7/012
- [5] McMurtry, D.R. (1982). Coordinate measuring machine. U.S. Classification: US433238A. International Classification: G01B11/005
- [6] Renishaw (2014a) Renishaw – Probing systems and software. Disponible en: <https://www.renishaw.com/en/probing-systems-and-software--12466> (Dic 2019).
- [7] Sahoo, K.C. & Meng, C.H. (1991). Localization of 3-D objects having complex sculptured surfaces using tactile sensing and surface. J Eng Ind, 113 (1), pp. 85-92. Doi: <https://doi.org/10.1115/1.2899626>
- [8] Zurbrick, J.R. & Kelley, J.R. (1984). Tool touch probe system and method of precision machining. U.S. Classification: US4428055A. International Classification: G05B19/4015
- [9] Chen, F., Brown, G.M., Song, M. (2000). Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods. Opt Eng, 39 (1), pp.10-22. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.602438>
- [10] Blais, F. (2004). Review of 20 years of range sensor development. J Electron Imaging, 13 (1). DOI: <https://doi.org/10.1117/1.1631921>
- [11] Bell, T., Beiwen, L., Zhang, S. (2016). Structured Light Techniques and Applications. Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, J. G. Webster (Ed.) DOI: <https://doi.org/10.1002/047134608X.W8298>
- [12] Carbone, V., Carocci, M., Savio, E. et al (2001). Combination of a Vision System and a Coordinate Measuring Machine for the Reverse Engineering of Freeform Surfaces. AMT, 17 (4), pp. 263-271. DOI: <https://doi.org/10.1007/s001700170179>
- [13] Bagci, E. (2009). Reverse engineering applications for recovery of broken or worn parts and re-manufacturing: Three case studies. Advances in Engineering Software, 40 (6), pp. 407-418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2008.07.003>

- [14] Zhang, G. & Wei, Z. (2002). A novel calibration approach to structured light 3D vision inspection. Optics & Laser Technology, 34 (5), pp. 373-380. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0030-3992\(02\)00031-2](https://doi.org/10.1016/S0030-3992(02)00031-2)
- [15] Gao, J., Chen, X., Zheng, D. et al. (2006). Adaptive restoration of complex geometry parts through reverse engineering application. Advances in Engineering Software, 37 (9), pp. 592-600. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2006.01.007>
- [16] Jarvis, R.A. (1983). A perspective on range finding techniques for computer vision. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell, 2, pp.122-139. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1983.4767365>
- [17] Besl, P.J. (1988). Active, optical range imaging sensors. Mach Vis Appl, 1 (2), pp.127-152. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01212277>
- [18] Rocchini, C., Cignoni, P., Montani, C. et al. (2002). A low cost 3D scanner based on structured light. In: computer graphics forum, vol. 20 (3), pp 299-308. Wiley Online Library. DOI: <https://doi.org/10.1111/1467-8659.00522>
- [19] Forest, J. & Salvi, J. (2002). A review of laser scanning three dimensional digitisers. In: IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems, 2002 (1), pp. 73-78. DOI: <https://doi.org/10.1109/IRDS.2002.1041365>
- [20] ZEISS COMET SYSTEM. Disponible en: <https://optotechnik.zeiss.com/en/products/3d-scanning/fringe-projection?ref=zeissint>
- [21] HP 3D scan. Disponible en: https://www8.hp.com/us/en/campaign/3Dscanner/overview.html?jumpid=va_t1345uf8k6, (Dic 2019).
- [22] FARO Cobalt Array Imager. Disponible en: <https://www.faro.com/es-es/productos/3d-manufacturing/faro-cobalt-array-imager/>, (Dic 2019).
- [23] PhoXi. Disponible en: <https://www.photoneo.com/products/phoxi-scan-m/>, (Dic 2019).
- [24] Yu, H., Huang, Y., Zheng, D. et al. (2019). Three-dimensional shape measurement technique for large-scale objects based on line structured light combined with industrial robot. Optik, in press. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163656>
- [25] Garmendia, I., Leunda, J., Pujana, J. et al. (2018). In-process height control during laser metal deposition based on structured light 3D scanning. Procedia CIRP, 68, pp. 375-380. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.098>
- [26] Garmendia, I., Pujana, J., Lamikiz, A. et al. (2019). Structured light-based height control for laser metal deposition. Journal of Manufacturing Processes, 42, pp. 20-27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.04.018>
- [27] Li, L., Schemenauer, N., Peng, X. et al. (2002). A reverse engineering system for rapid manufacturing of complex objects. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 18 (1), pp. 53-67. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0736-5845\(01\)00026-6](https://doi.org/10.1016/S0736-5845(01)00026-6)

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo quieren agradecer al ministerio de economía y competitividad por la financiación del Proyecto ADDICLEAN (ref. RTC-2015-4194-S), a la comisión europea por la financiación del proyecto PARADDISE (ref. 723440), que es una iniciativa de "Photonics and Factories of the Future Public Private Partnership", y a la Viceconsejería de Tecnología, Innovación y Competitividad del Gobierno Vasco, por la financiación del proyecto ADDISEND (ref. kk-2018/00115) dentro del programa Elkarte 2018.