

Metalografía de la fabricación aditiva (AM)



DANISH
TECHNOLOGICAL
INSTITUTE

Struers
Ensuring Certainty

Aplicación Notas

¿Qué es la AM?

Como su nombre indica en inglés, AM añade material para crear un objeto. El término "fabricación aditiva" (AM por sus siglas en inglés), también conocido como impresión 3D, hace referencia a tecnologías que crean objetos 3D de capa superfin a capa superfina. Cada capa sucesiva se une a la capa anterior de material fundido o parcialmente fundido para crear componentes, piezas e incluso productos completos. La AM se conoce, y con razón, como lo contrario a la fabricación sustractiva. En lugar de astillar piezas de un bloque grande para revelar la parte "oculta" en su interior, la AM ensambla las "virutas" de material hasta crear una pieza nueva.

Ventajas de la fabricación aditiva (AM)

En el caso de prototipos y modelos, la ventaja de la AM es sencilla. Puede crear fácilmente una representación 3D única de su diseño o incluso un prototipo funcional que se puede utilizar para probar el rendimiento del diseño. A menudo, el coste es una fracción de lo que costaría fabricar una construcción única con los métodos de fabricación convencionales. Hoy en día, sin embargo, las ventajas de la AM para algunos productos o aplicaciones son tan importantes que están asumiendo la producción en serie de componentes de la fabricación convencional. Las ventajas que impulsan la transformación hacia la AM son:

Mejoras de diseño

La AM puede crear piezas con geometrías complejas como un solo objeto. Por lo tanto, se pueden integrar varias piezas en una en la fase de diseño, lo que permite mejorar la resistencia, reducir el peso y aumentar la durabilidad.

Con relación a las herramientas utilizadas en la producción, la AM puede desempeñar un papel importante en la mejora de los procesos de trabajo, el aumento de la producción y la fabricación de mejores piezas. La herramienta de centrado de Danfoss que se muestra en la Fig. 1, es un ejemplo donde la reducción de peso evitó que los usuarios tuvieran que levantar kilos adicionales cada día. El caso



Figura 1. Herramientas y medios auxiliares de fabricación

Marel en la Fig. 3 también ilustra cómo un elemento de soporte utilizado en la producción industrial de carne mejoró el diseño para optimizar el rendimiento en las propiedades de contacto con los alimentos.

El caso de DanSTAR en la Fig. 4 es otro ejemplo de cómo se ha utilizado la AM para mejorar el diseño y garantizar un funcionamiento de alto rendimiento. La boquilla de cohete 3D aprovecha la libertad de diseño que ofrece la fabricación aditiva (AM). Las mejoras de diseño también se utilizan en el caso de Hydrauvision en la Fig. 5, para mejorar el rendimiento del bloque hidráulico optimizado.

Ahorro de costes

La producción de piezas de forma prácticamente neta reduce la generación de material residual, lo que genera gran interés en los casos de piezas de alto valor. La eliminación de herramientas costosas en la fabricación convencional y el

Danfoss: Herramienta de centrado

Danfoss ha comenzado a imprimir en 3D una herramienta de centrado utilizada para montar un motor eléctrico en uno de los compresores de la empresa. El fondo para la impresión en 3D de la herramienta respondió al deseo de eliminar todo el material innecesario para reducir el peso y el precio, pero al mismo tiempo conservar la suficiente masa como para que la herramienta fuera lo suficientemente robusta.

Datos y rentabilidad durante el rediseño para la AM:

-  Con la AM, la herramienta se volvió mucho más ligera: De 1100 g (aluminio) a 382 g (titanio)
-  Diseño de geometría compleja que permite reducir el peso
-  Impresión 3D con tecnología SLM en polvo de titanio
-  El peso reducido hace que la herramienta sea más fácil de manejar para los operarios que la levantan 180 veces al día.
-  No obstante, la herramienta de impresión 3D tiene una vida útil significativamente más larga, por lo que el precio anual se reduce en un 63 %.

ahorro en ensamblajes que requieren mucha mano de obra debido a la consolidación de piezas también están reduciendo los costes de fabricación aditiva (AM).

Un ejemplo de ello es la extrusión de galletas, un proceso que Bühler-Meincke utiliza en sus máquinas para intercambiar los trabajos manuales intensivos por la AM, véase la Fig. 6.

Reducción del tiempo de entrega

Gracias a la tecnología de forma prácticamente neta, las piezas fabricadas pueden estar listas para usar directamente desde que salen de la máquina o tras un posprocesamiento limitado. En la fase de diseño esto puede facilitar una rápida introducción en el mercado, en el proceso de fabricación puede ahorrar tiempo y costes o producir piezas únicas, y en los servicios de fin de vida útil puede facilitar la entrega de piezas de recambio sin almacenar piezas para el mercado de posventa.



Historia de la AM

El nacimiento de la impresión 3D se atribuye a Hideo Kodama, quien en 1981 inventó el concepto de impresión 3D que fue patentado en 1983 y posteriormente comercializado por Charles Hull. Mientras que el resto de formas básicas de fabricación se conocieron mucho antes que la revolución industrial, acelerando la fabricación hasta llegar a lo que hoy conocemos como tal, la AM es una novedad digital que todavía no está plenamente actualizada.

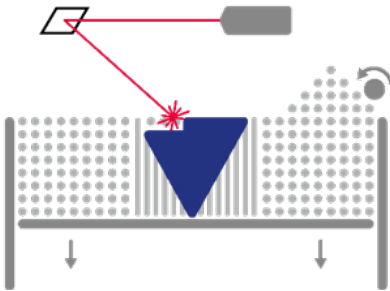


Figura 2. Fusión láser del lecho en polvo (L-PBF)

Las primeras impresoras 3D utilizaron la luz para activar las resinas fotopoliméricas y así crear piezas de polímeros. La primera impresora metálica disponible en el mercado, la EOSINT M250, fue lanzada por EOS GmbH en 1994, pero solo con capacidad para sinterizar una mezcla de materiales compuesta de bronce y níquel. En el plazo de unas pocas décadas, la AM ha pasado de ser una herramienta para fabricar modelos y prototipos a convertirse en un proceso de producción de piezas a gran escala. Hoy en día, los componentes metálicos de la AM operan en funciones muy críticas, como muelles de torsión para monoplazas de F1, pinzas de freno en el hipercoche Bugatti Chiron, la mayoría del vehículo Koenigsegg C21, las boquillas de combustible y álabes de turbina en los motores de chorro LEAP y GE9X, los propulsores del cohete SpaceX Dragon, implantes médicos y recientemente en el vehículo móvil Perseverance que aterrizó en Marte. La fabricación aditiva (AM) de metal ha entrado en aplicaciones críticas en las que el control y la garantía de calidad son fundamentales. Aunque la AM ha entrado



Marel: Elemento de soporte para el corte industrial de carne

Para un nuevo módulo de corte porcionado industrial, Marel necesitaba un elemento de soporte que pudiera detener la carne en la cinta transportadora, sujetarla mientras se cortaba la cuchilla y, a continuación, mover las piezas cortadas hacia delante. El deseo era un peso reducido y pocos conjuntos en los que se pudieran acumular bacterias. La fabricación aditiva (AM) se eligió por varias razones.

Datos y rentabilidad durante el rediseño para la AM:

-  De 42 componentes a 1 componente
-  De 45 conjuntos a 6 conjuntos
-  Previamente mecanizado en acero inoxidable 316L, ahora impreso en titanio.
-  Reducción de peso de 600 g a 250 g
-  Mismo precio que antes

Figura 3. Máquina aprobada para contacto con alimentos

en el mercado de las piezas críticas de alto rendimiento, ese no es su único campo de aplicación. La AM también se utiliza para herramientas y moldes con refrigeración conformal, piezas de maquinaria y pinzas para aplicaciones industriales, así como para mercancías de consumo, como ruedas de camionetas de gramófono de gama alta y ruedas de polea para bicicletas de carreras.

Procesos de la AM

El campo de la AM está lleno de diferentes abreviaturas de procesos, principalmente porque los diferentes fabricantes de máquinas han registrado los mismos procesos bajo distintos nombres de marca. Aunque existen numerosas marcas y abreviaturas, la norma ISO/ASTM 52900:2017 define una

terminología común para la fabricación aditiva (AM), así como un marco que clasifica los diferentes procesos en siete tipos principales de AM: Fotopolimerización, extrusión de material, laminación, fusión de lecho de polvo, inyección de aglutinante, inyección de material y deposición de energía directa. Esta nota de aplicación se centra en la fusión láser del lecho de polvo (L-PBF), también conocida como fusión directa de metales por láser (DMLM) y fusión selectiva por láser (SLM). La tecnología consiste básicamente en soldar con láser partículas finas de polvo de metal, capa a capa. Véase la Fig 2. La tecnología L-PBF incluye innumerables parámetros de proceso que pueden influir en las propiedades y la calidad del componente final.

El escaneo láser

Al principio, se distribuye uniformemente un polvo metálico fino de partículas esféricas (de 15 a 60 μm de diámetro) por una plataforma base compuesta de un material compatible con el polvo de construcción. Cuando el polvo se ha esparcido en una capa fina de solo 30-90 μm de grosor, el láser la escanea a través del polvo, calentándola y soldándola entre sí, y soldándola también a las capas situadas directamente debajo. En el caso de las primeras capas, esto también significa soldar la pieza a la plataforma de construcción. Después de que el láser haya escaneado la capa, la plataforma se mueve un incremento de capa hacia abajo y se distribuye la siguiente capa de polvo metálico fino, después de lo cual el láser escanea y suelda la nueva capa. Por lo tanto, el proceso se repite numerosas veces hasta que las a menudo miles de capas apiladas forman el componente final. Potencia láser, velocidad de escaneo, distancia entre escotillas o espaciado entre escaneos láser, grosor de la capa de polvo y estrategia de escaneo. Todos estos son parámetros del proceso que afectan a la forma en que se construyen las capas en el componente. Para añadir suficiente energía y crear una fusión completa, se ajustan tanto la potencia del láser como la velocidad de escaneo. El espaciado entre los escaneos láser suele ser más bajo que el ancho del charco de fundido para, de este modo, asegurar el solapamiento entre escaneos láser adyacentes. El grosor de la capa suele estar determinado por el tamaño del polvo metálico y la necesidad de una penetración completa del charco de fundido con el material subyacente.

La atmósfera

El proceso se encuentra en una cámara cerrada con un vacío o, más comúnmente, una atmósfera protectora de nitrógeno o argón, dependiendo de la reactividad del material de impresión que se esté procesando. El gas protector se sopla a través de la superficie de construcción para ayudar también a eliminar la escoria y las salpicaduras del proceso de soldadura de la próxima zona de soldadura.



DanSTAR: Boquilla de cohete impresa en 3D

Los estudiantes del proyecto DanSTAR tienen una cámara de combustión impresa en 3D de acero inoxidable para un cohete diseñado y desarrollado por ellos desde cero. La impresión 3D fue la solución obvia para la cámara de combustión, ya que consiste en geometrías internas muy complejas que son casi imposibles de lograr con otras tecnologías de producción.

Datos durante el diseño para la AM:



El único motor de cohete líquido de Europa resistente a combates elaborado por estudiantes y construido para alcanzar una altitud de 30 000 pies.



La libertad de diseño dio como resultado un diseño inteligente en el que el combustible circula a través del motor monolítico de AM en canales que discurren a lo largo de la propia pared resistente a la presión, antes de la inyección en la cámara de combustión. Está



impreso en acero inoxidable 316L, tiene un peso de 5,7 kg, y no fue necesario mecanizarlo después de la impresión 3D y el posprocesamiento inicial.



Los grandes fabricantes de motores espaciales como, por ejemplo, SpaceX y Orbex, también utilizan la AM y el proceso de refrigeración regenerativa.

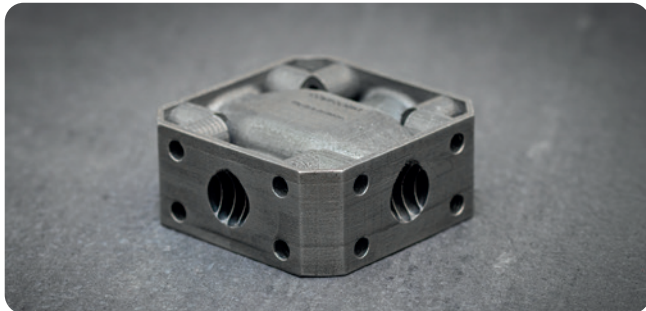
Figura 4. Boquilla de cohete para un proyecto estudiantil

La plataforma de construcción se calienta para ajustar la velocidad de enfriamiento del material de construcción a medida que se suelda. Esto ayuda a controlar la metalurgia formada en la pieza durante el proceso de impresión y reduce la formación de tensiones residuales.

Dentro de la cámara de construcción, normalmente se pueden controlar los parámetros relacionados con la atmósfera, como el tipo de gas inerte y su pureza, la presión de la cámara y la temperatura. El proceso de construcción se suele llevar a cabo con una pequeña sobrepresión para evitar la oxidación si hubiera una fuga y para estabilizar el charco de fundido superando una fuerza.

Tratamiento de destensión y calor

Una vez finalizado el proceso de construcción, las piezas a menudo se destensan durante varias horas en un entorno protegido por gas. Si no se destensan, algunos materiales y geometrías se agrietarán y deformarán debido a las tensiones residuales tan pronto como se corten de la placa de construcción. Dado que las piezas construidas con L-PBF son una soldadura de gran tamaño, por naturaleza vienen con una microestructura muy fina que se ha enfriado rápidamente. En la mayoría de los casos, esto da como resultado una pieza de alta resistencia y baja ductilidad. Sin embargo, mediante el tratamiento térmico, las propiedades mecánicas de las piezas L-PBF se pueden adaptar a propiedades mecánicas específicas o resistencia a la corrosión.



Hydrauvision: Bloque hidráulico compacto

En el proyecto Compolight financiado por la UE, el DTI imprimió un bloque hidráulico más compacto y optimizado para la empresa holandesa Hydrauvision. El nuevo bloque hidráulico impreso en 3D mejoró el flujo en los sistemas hidráulicos, eliminando así grandes pérdidas de energía y reduciendo significativamente el peso y el tamaño.

Datos durante el rediseño para la AM:



Importante reducción de tamaño y peso (de 20,15 kg y 230 x 230 x 54 mm a 0,95 kg y 80 x 80 x 50 mm)



Mayor potencia con una reducción del 25 % en la pérdida de presión (al reducir la pérdida de presión en el sistema, no se necesita un sistema hidráulico tan grande como antes para realizar la tarea)



La libertad de diseño dio como resultado una nueva solución sin ángulos rectos y con una construcción mucho más compleja que permite un flujo de aceite y aire inhibido en todo el sistema.

Figura 5. Componente de alta presión con resistencia al flujo reducida



Bühler-Meincke: Boquillas para la producción de galletas

Bühler-Meincke comenzó con la AM de metal para sus boquillas de galletas. Esto les brindó una gran libertad de diseño y les permitió crear geometrías que no eran posibles con la fabricación tradicional; antes, la producción era manual y dependía de un solo hombre que soldaba las boquillas entre sí a partir de varias piezas.

Datos y rentabilidad durante el rediseño para la AM:



Máxima libertad de diseño y rediseño sin grandes costes de herramientas



Sin juntas ni soldaduras donde se puedan acumular bacterias



Trazabilidad completa a través de la producción y la capacidad de imprimir en varios materiales, todo aprobado para el contacto con alimentos



Producción simplificada y sin variaciones en el resultado



Producción más rápida a un precio más bajo

Figura 6. Producción en serie de piezas complejas

Materiales de la AM

Hoy en día, el principal factor limitante con relación a la disponibilidad de aleaciones para L-PBF son los parámetros de procesamiento requeridos. Es necesario procesar diferentes aleaciones utilizando diferentes parámetros personalizados para garantizar que los materiales sean completamente densos, minimizar la acumulación de tensión residual, lograr las mejores superficies posibles y optimizar la velocidad de producción para limitar el tiempo de la máquina y, por lo tanto, reducir el coste. En algunos casos, también se requieren tratamientos térmicos a medida para garantizar la microestructura final deseada y las propiedades mecánicas.

En algunos casos, el hardware puede ser un factor limitante. Algunas aleaciones requieren una cámara de construcción calentada, condiciones atmosféricas especiales y/o una alta potencia láser que sea fabricable.

Las aleaciones de metal disponibles provenían inicialmente de industrias que impulsaban el desarrollo de la AM, principalmente la industria automovilística, aeroespacial y médica. Esto significó que el desarrollo inicial dentro de las aleaciones y los parámetros de producción para las aleaciones de la AM se centraron en el TiGr5 para uso aeroespacial y el Ti Gr1 o Gr23 para uso con implantes. El AlSi10Mg es una aleación de fundición muy conocida en la industria automovilística, y también se adoptaron aceros para herramientas como H13, algunas variaciones de Inconel y otras aleaciones a base de níquel, así como el acero inoxidable 316L para su uso en la AM. En el mercado siguen apareciendo múltiples aleaciones nuevas y rediseñadas. La base de datos de materiales de Senvol contiene en 2021 más de 1200 entradas de materiales para aleaciones metálicas L-PBF.

Características de los materiales

En general, las propiedades mecánicas y las densidades de las piezas de AM son iguales o mejores que las piezas fabricadas tradicionalmente.

La gran cantidad de parámetros de proceso relacionados con el proceso L-PBF requiere un control y un ajuste cuidadosos para evitar la iniciación de defectos y garantizar la calidad final de la pieza. Los defectos y desviaciones más comunes relacionados con el proceso L-PBF se describen y clasifican en 3 grupos principales:

Calidad de la superficie

Sin posprocesamiento, la gran rugosidad de la superficie de las piezas de AM es la diferencia más obvia, mientras que el cambio de la superficie a través del mecanizado, el pulido, el chorreado de vidrio, etc. forma parte integral de la fabricación. Los defectos relacionados

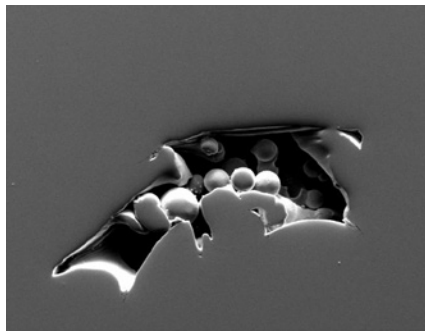
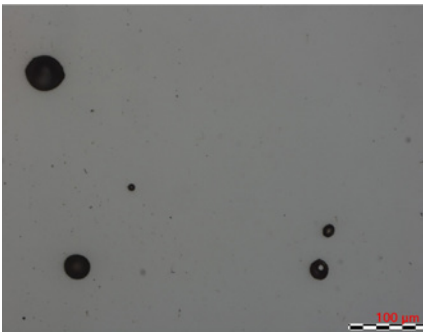


Figura 7. Sección transversal pulida de L-PBF. Ejemplo de porosidad del gas (arriba). Ejemplo de falta de porosidad de fusión (abajo).

con la superficie, como la rugosidad y su morfología, se ven muy influenciados por los parámetros del proceso y las especificaciones del láser, como la velocidad de escaneo, la distancia de la escotilla, la estrategia de escaneo y el tamaño del punto.

Geometría y desviación de la dimensión

La contracción térmica debida al calentamiento cíclico puede provocar desviaciones dimensionales en comparación con el modelo CAD. La contracción se puede producir tanto en la dirección X, Y como en la dirección Z y, a menudo, se puede reducir ajustando parámetros como la potencia del láser y la estrategia de escaneo.

Defectos en la microestructura

Las porosidades son un defecto microestructural frecuente y bien conocido en relación con el proceso L-PBF. La cantidad, el tamaño y la forma de las porosidades afectan directamente a la densidad y las propiedades mecánicas. Los tipos de porosidades se clasifican, típicamente, como falta de porosidades de fusión o porosidades de gas. La falta de porosidades de fusión suele ser el resultado de un desequilibrio entre los parámetros del proceso, como la potencia del láser, la velocidad de escaneo y la distancia de la escotilla, lo que provoca una entrada de calor demasiado baja, la falta de penetración o la falta de solapamiento entre los escaneos láser. La falta de porosidades de fusión suele tener una forma irregular y puede actuar como concentración de tensión, lo que reduce las

propiedades de fatiga; véase la Fig. 7 (inferior). Las porosidades de gas tienen forma esférica y pueden estar relacionadas, típicamente, con gases atrapados en las partículas de polvo de metal bruto o gases inertes atrapados durante el proceso de fabricación de L-PBF; véase la Fig. 7 (superior).



Figura 8. Variedad de muestras metálicas elaboradas mediante fabricación aditiva (procesos de fusión láser).

La heterogeneidad puede ocurrir simultáneamente en la microestructura a medida que el material impreso se somete a secuencias cíclicas de conducción de calor vertical, fusión repetida y solidificación rápida. Además, la geometría de la pieza impresa puede afectar potencialmente a la condición de solidificación, lo que provocará variaciones en la microestructura.

La anisotropía desarrollada por el proceso L-PBF introduce diferencias en las propiedades mecánicas en diferentes ángulos en relación con la dirección de construcción. Esto significa que la orientación de la pieza debe tenerse en cuenta antes de iniciar el proceso de impresión.

Preparación metalográfica para investigación microestructural de material de la AM

Muestras de AM

Las materias primas en polvo se investigan en determinadas situaciones en relación con su distribución, forma o estructura del tamaño de las partículas.

La pieza final impresa no se destruye y, por lo tanto, las muestras de prueba para el análisis microestructural son pequeñas varillas, barras

o cubos impresos junto con la pieza que permiten reflejar las condiciones de fusión láser y las propiedades microestructurales en cada capa individual. Figura 8. Cuando el objetivo de la investigación metalográfica es analizar un poro, una grieta, una impureza o cualquier otro atributo o defecto microscópico, la muestra se clasifica como muestra objetivo.

Preparación de la fabricación aditiva (AM) en general

Para los 3 tipos de muestras de AM (materia prima en polvo, pieza impresa o muestra objetivo), los requisitos son como los conocemos: la superficie debe ser plana y no presentar arañazos, todos los elementos estructurales deben ser claramente visibles y la microestructura después de la preparación debería estar libre de deformaciones y artefactos. Por lo general, todos los pasos conocidos de los materiales fabricados de forma convencional son aplicables y las reglas de preparación metalográfica están determinadas siempre por las propiedades del material en sí.

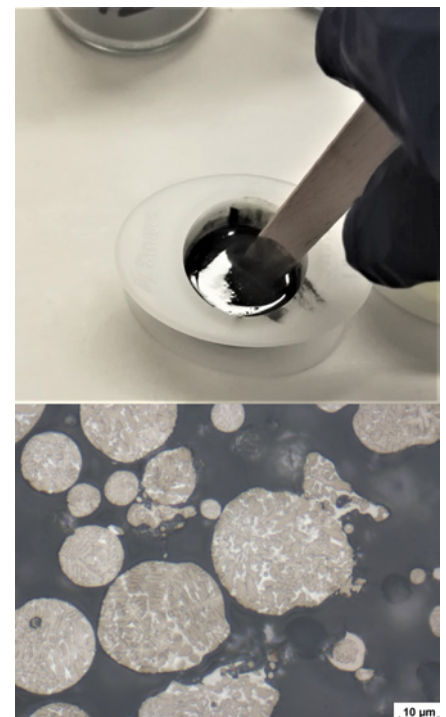


Figura 9. Polvo de acero metálico agitado en FixiForm con CaldoFix-2 (arriba). Pulido y ataque químico con solución de ataque Klemm modificada (abajo). Campo claro.

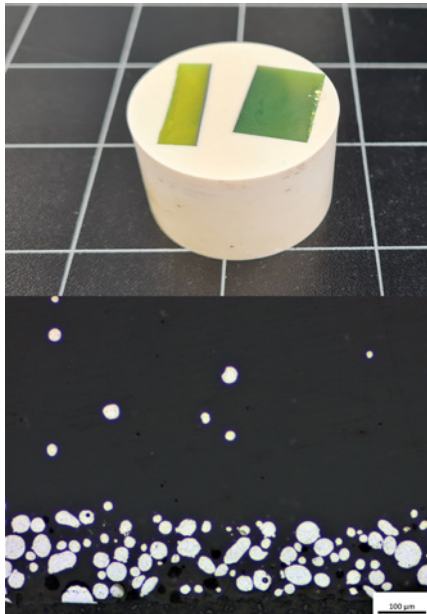


Figura 10. Sección transversal a través de embutición con polvo AlSiMg10 en EpoFix, reembutada en DuroCit-3 (arriba). La muestra pulida detalla la distribución microscópica, el tamaño y la forma del material en polvo (abajo).

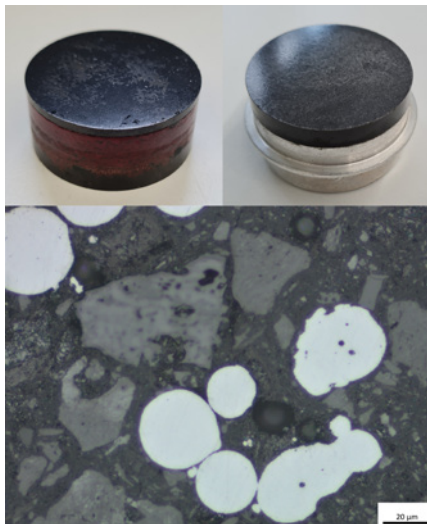


Figura 11. Tabletas de polvo metálico enriquecido PolyFast, prensadas en CitoPress, encoladas temporalmente en una muestra de prueba MultiFast (arriba a la izquierda). Tableta pegada sobre un bloque de soporte metálico (parte superior derecha), para su posterior investigación en un SEM. Imagen microscópica de partículas de polvo de acero (abajo) en PolyFast. Campo claro.



Figura 12. Sujeción de una muestra de titanio de AM en Secotom-60

Estas propiedades son principalmente dureza, ductilidad y resistencia química. El proceso metalográfico sigue la secuencia convencional de: corte, embutición, esmerilado, pulido mecánico o electropulido y un ataque químico final si es necesario. Los pasos del proceso tendrán una importancia diferente en función del tipo de muestras, y el equipo utilizado se seleccionará según el tipo de muestra y el objetivo de la investigación metalográfica.

Preparación metalográfica de materias primas en polvo

La embutición en frío en resinas epoxi es el mejor método cuando se necesita investigar polvos. El polvo se puede agitar lentamente en la resina para tener una mayor cantidad de polvo para investigar. (Fig. 9). Dependiendo del tamaño de la partícula, el estado de aglomeración, la densidad del material y la viscosidad de la resina, las fracciones de polvo más grandes podrían hundirse como una capa o permanecer en equilibrio. Cuando se desea el hundimiento de fracciones de polvo de tamaño pequeño o materiales ligeros, el calentamiento de la resina durante algunos minutos permite un hundimiento más fácil de fracciones de polvo de tamaño pequeño o materiales ligeros. Para examinar toda la distribución del tamaño de las partículas, resultará útil realizar un corte longitudinal a través del molde y volver a montarlo en un ángulo de 90°. (Fig. 10). La embutición en caliente de polvos es posible y requiere resina sin rellenos metálicos, a menos que un ataque químico adicional pueda ayudar a distinguir el polvo de la resina. En algunos casos, puede resultar útil prensar una tableta de resina enriquecida con polvo. La propia tableta se puede pegar temporalmente a una muestra de prueba o a un bloque de soporte metálico del mismo diámetro (Fig. 11).

Preparación metalográfica de muestras de comprobación de AM

Se debe establecer y definir el área de interés en una pieza de trabajo impresa. La llamada dirección de acumulación debe tenerse en cuenta antes de iniciar el corte. La orientación más utilizada es paralela

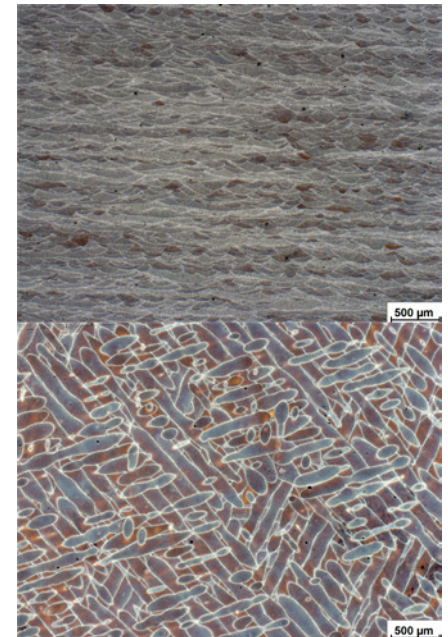


Figura 13. Sección longitudinal (arriba) y transversal (abajo) de aleación AlSi10Mg, grabada con solución de ataque Fuss. Campo claro.

a la dirección de reconstrucción, es decir, "la sección longitudinal". Otra vista importante de la microestructura es perpendicular a la dirección de la reconstrucción y se denominará "sección transversal" (Fig. 13.)

El resto de ángulos definidos para el proceso de reconstrucción también es posible, aunque no tan común. En tal caso, se debe capturar el ángulo de corte.

Dado que las muestras de prueba de AM son piezas pequeñas que representan la pieza de trabajo grande, se necesita un corte preciso y, por lo tanto, se prefieren soluciones de corte de precisión. La solución también debe incluir herramientas de sujeción para muestras cuadradas, redondas o largas, así como adaptadores para sujetar la muestra en la posición precisa, por ejemplo, un ángulo específico o la distancia al disco de corte. En la Fig. 12 se muestra una máquina Secotom-60 con una solución de sujeción para el posicionamiento preciso de piezas de trabajo pequeñas. El posicionamiento está asistido por una línea láser. El equipo de corte de precisión facilita el corte preciso utilizando un disco de corte relativamente pequeño y fino seleccionado según el material y la dureza del material. Si es necesario cortar muestras muy pequeñas o si la geometría es muy compleja, cortar la muestra después de embutirla en resinas epoxi transparentes (EpoFix, CaldoFix-2) puede ayudar a su fijación y protección. Para las muestras de comprobación AM, el proceso de montaje no será tan importante como para la preparación de polvos u objetivos.

Las características especiales de la resina, como la transparente o la conductiva, serán parámetros que se aplicarán a la selección de la resina, así como a la dureza del material. Dependiendo del material de la muestra, el tamaño y la geometría tras el corte inicial, es posible realizar procesos de embutición en frío y en caliente. Se recomienda la embutición en frío si las muestras son frágiles y muy pequeñas o si tienen una forma complicada. En la siguiente sección se muestran los métodos estándar de preparación de la superficie para 4 grupos de materiales típicos utilizados en la AM.

Equipos:	LectroPol-5
Electrolito:	A3
Tamaño de la máscara:	1 cm ²
Temperatura:	Temperatura ambiente 18-20 °C
Caudal:	10-15
Tensión:	34-45 V
Tiempo:	20-30 s

Tabla 1. Método de preparación para el pulido electrolítico del titanio

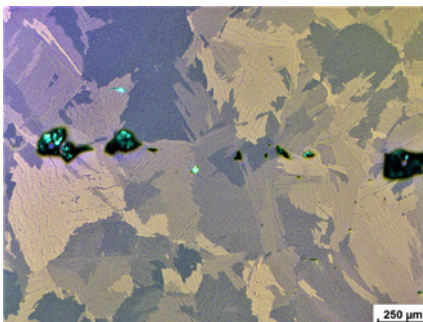


Figura 14. Muestra final de titanio pulido con poros. Pulida en MD-Chem con OP-S NonDry y aditivo, microestructura visible en contraste de polarización.



Figura 15. Aleación de titanio en modo de campo claro. Preparación electrolítica con A3, campo claro sin embutir.

Titanio

Debido a su extrema ductilidad, el titanio es propenso a la deformación mecánica y al rayado durante la preparación metalográfica. Se debe evitar el pulido con diamante, especialmente con titanio puro, ya que introduce arañazos y manchas. Una vez introducidos, esta capa de deformación es difícil de eliminar. Para evitar este problema, se puede utilizar un pulido químico-mecánico

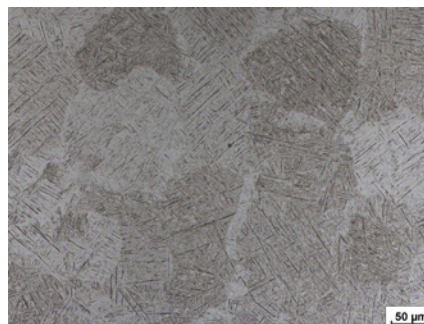


Figura 16. Aleación de titanio pulida electrolíticamente y sometida a ataque químico con reactivo Fuss. Campo claro.

directamente después del esmerilado plano y fino. El método de tres pasos de la Tabla 2 es un procedimiento probado que ofrece resultados excelentes y reproducibles para el titanio y las aleaciones de titanio. Una opción rápida y de baja deformación, especialmente útil para las aleaciones de titanio menos aleadas, es el electropulido. La muestra se puede pulir hasta obtener una superficie similar a la de un espejo después de unos minutos, lista para la investigación. En la Tabla 1 se muestra un método para el pulido electrolítico. Antes de poder utilizar el pulido electrolítico, se recomienda realizar un esmerilado previo o un pulido previo de la superficie. El tiempo necesario para realizar el pulido electrolítico depende de la rugosidad de la superficie, es decir, las superficies más finas requieren menos tiempo. El método de la Tabla 1 es adecuado para equipos como LectroPol-5 de Struers. En la Fig. 15 se muestra la microestructura de una muestra electropulida de titanio fabricada con aditivos.

Paso		PG	FG	OP
	Superficie	MD-Mezzo	MD-Largo	MD-Chem
	Abra-sivo			
	Tipo	Diamante	Diamante	Sílice coloidal
	Tamaño	#220	9 µm	0,25 µm
Suspensión / Lubricante		Agua	DiaPro Allegro/Largo 9	OP-S*
rpm		300	150	150
Fuerza [N]/muestra		40***	30	15
Tiempo (min)		Hasta conseguir superf. plana	5	5**

Tabla 2. Métodos de preparación de esmerilado y pulido para muestras de titanio de 30 mm sin embutir.

* Mezclar 70-90 % OP-S con 10-30 % H2O2 (de 30 % conc.).

** El tiempo de pulido depende del área de la muestra. Las muestras de gran tamaño requieren más tiempo de pulido que las pequeñas.

*** Reducir a 25 N para evitar formas de lápices en la preparación de muestras individuales de muestras embutidas.

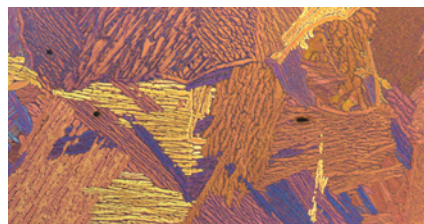


Figura 17. Aleación de titanio tras ataque químico con reactivo Keller. Luz polarizada.

Para revelar información más específica de la muestra de titanio, será necesario realizar un ataque químico después de la preparación mecánica o electrolítica. Las características de resistencia química del titanio requieren un ataque químico agresivo con soluciones de ataque que contengan ácido fluorhídrico. La cantidad de HF varía y los reactivos que se usan a menudo se conocen como "Keller", "Kroll" o "Fuss"; véase la Fig. 16. La luz polarizada es una técnica de ataque químico óptico, indicada especialmente para los materiales estructurados hexagonales, como el titanio. Se puede utilizar después del pulido de óxido (véase la Fig. 14), o después de métodos de grabado adicionales especiales como Keller (véase la Fig. 17).

Aluminio

Aunque, en general, el aluminio es blando, los elementos de aleación pueden cambiar drásticamente las propiedades mecánicas. Los desafíos en la preparación del aluminio son la introducción de deformaciones profundas durante el esmerilado o la incrustación de abrasivos duros en el material durante el

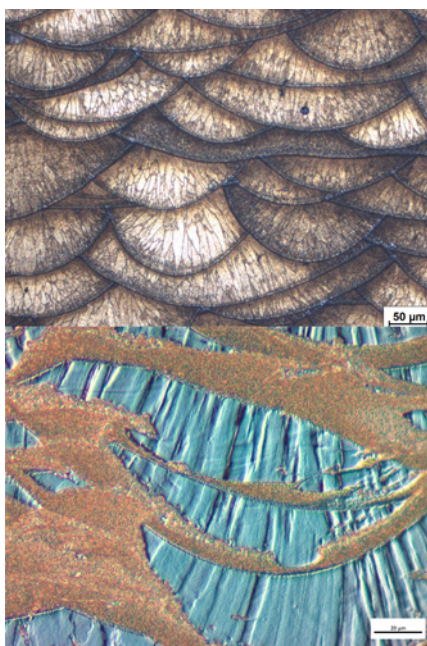


Figura 18. Distintas aleaciones de aluminio tras el grabado Barker en campo claro (arriba) y el contraste diferencial de interferencia, DIC, (abajo).

Paso	PG	FG	DP 1	OP
Superficie	MD-Molto	MD-Largo	MD-Mol	MD-Chem
Abra-sivo	Tipo	Diamante	Diamante	Diamante
	Tamaño	#220	9 µm	3 µm
Suspensión / Lubricante	Agua	DiaPro Allegro/Largo 9	DiaPro Mol R3	OP-S NonDry
rpm	300	150	150	150
Fuerza [N]/muestra	25	30	25	15
Tiempo (min)	Hasta conseguir superf. plana	4	3	1

Tabla 3. Método de esmerilado y pulido para muestras no embutidas de 30 mm de aluminio

esmerilado o pulido. Esto puede ocurrir si la superficie de preparación seleccionada es demasiado dura o agresiva. La calidad del resultado del pulido también supone un reto para el aluminio, ya que se necesita una superficie bien pulida para crear un contraste suficiente para el análisis de microestructuras. En la Tabla 3 se muestra un método de preparación para aluminio. Se desarrolló específicamente una superficie rígida de esmerilado plano, MD-Molto, para aleaciones de aluminio superiores a 50 HV1. MD-Molto ofrece buenas tasas de eliminación y elimina el riesgo de redondeo de bordes que se puede ver al utilizar papeles o láminas SiC. En el esmerilado fino, el disco MD-Largo con suspensión de diamante de 9 µm (por ejemplo, DiaPro Allegro/Largo) es adecuado para muchos tipos de materiales y se elige para el aluminio a fin de abordar el reto de la deformación y los arañazos, así como el riesgo

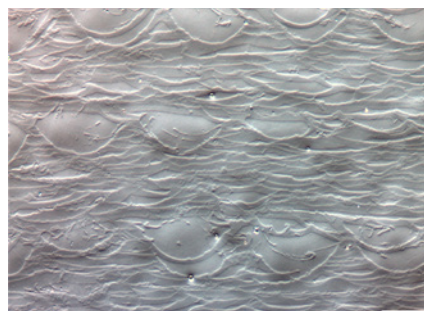


Figura 19. Superficie pulida fina de aleación de aluminio. Pulido con MD-Chem y OP-S. Contraste diferencial de interferencia, DIC, sin ataque químico.

de incorporar diamantes en el material blando. La compensación de este esmerilado fino suave es una baja tasa de eliminación, lo que se traduce en tiempos de esmerilado fino más largos.

La necesidad de un proceso de pulido exhaustivo del aluminio se aborda mediante la combinación de un diamante y un paso de pulido de óxido. Se utiliza un paño de lana suave, MD-Mol, con suspensión de diamante de 3 µm, seguido de un paso de pulido de óxido con sílice coloidal, OP-U. Las suspensiones de pulido final deben utilizarse en una superficie como MD-Chem. Para una mejor planitud y retención de bordes, también se puede utilizar otro paño con menor resiliencia (MD-Nap).

Para revelar más detalles o detalles específicos en las estructuras de aluminio, se pueden utilizar métodos químicos, electroquímicos y un ataque químico óptico, o una combinación



Figura 20. Equipo de preparación electrolítica de Struers, LectroPol-5

	Paso		 PG	 FG	 DP 1	 OP
	Superficie		MD-Alto	MD-Largo	MD-Dac	MD-Chem
	Abra-sivo	Tipo	Al2O3	Diamante	Diamante	Sílice/alúmina
		Tamaño	#180 / 220	9 µm	3 µm	0,25 - 0,01 µm
	Suspensión / Lubricante		Agua	DiaPro Allegro/Largo 9	DiaPro Dac 3	OP-S NonDry/OP-A
	rpm		300	150	150	150
	Fuerza [N]/muestra		25	40	20	15
	Tiempo (min)		Según se necesite	5	4	2-3

Tabla 4. Método de esmerilado y pulido para muestras de 30 mm sin embutir de acero inoxidable.

Equipos:	LectroPol-5
Electrolito:	200 ml de agua + 10 ml de ácido fluorobórico (35 %) (Barker's)
Tamaño de la máscara:	2 cm²
Tensión:	24 V
Caudal:	8
Tiempo:	1-2 min

Tabla 5. Método de preparación para pulido electrolítico y ataque químico de aluminio

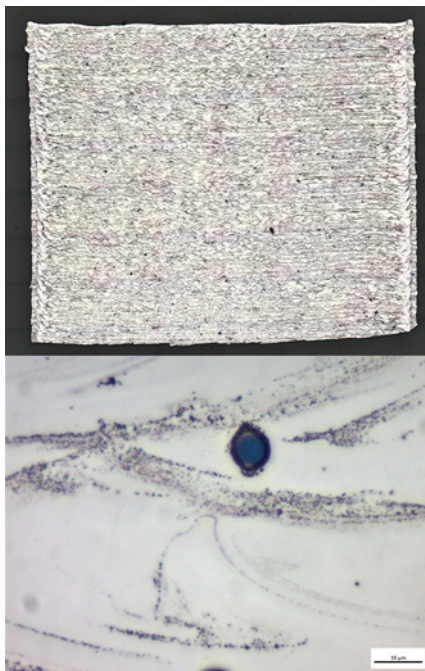


Figura 21. Vista general de una aleación de aluminio AM tras ataque químico con Barker (arriba). Detalle de aleación de aluminio, con precipitación en gran aumento (abajo). Campo claro.

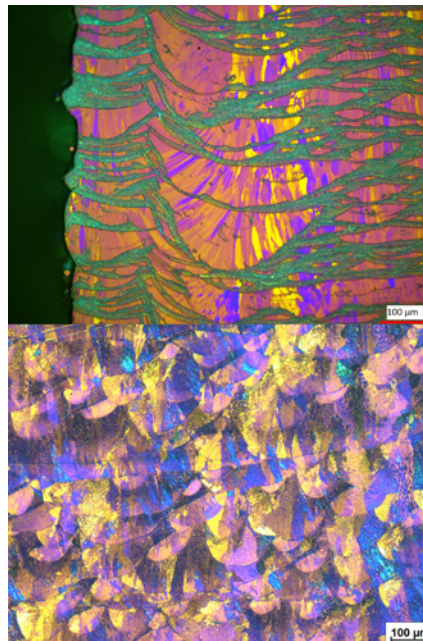


Figura 22. Aleación de aluminio tras ataque químico con Barker (arriba). Inconel sometido a ataque químico con Adler (abajo). Luz polarizada.

de ambos. Fig. 19: muestra pulida con contraste diferencial de interferencia. Con esta técnica, se hace hincapié en la información topográfica de la superficie de la muestra. Fig. 18: muestras sometidas a un ataque electrolítico con reactivo de Barker. Fig. 22: muestra después de ataque con reactivo de Barker bajo una luz polarizada. En la Tabla 5 se muestra un método para el ataque electrolítico de aluminio con reactivo de Barker. El método es adecuado para la LectroPol-5 de Struers. Véase la Fig. 20.

Aceros inoxidables y aleaciones a base de níquel

Los aceros inoxidables y las aleaciones a base de níquel suelen ser blandos y dúctiles. Por lo tanto, se debe evitar el uso de superficies de esmerilado muy toscas y alta presión. Para solucionar este problema, se utiliza un disco de esmerilado plano específico para estos materiales: MD-Alto (Tabla 4). El esmerilado fino deberá realizarse con suspensión de diamante en un disco rígido (MD-Largo) o, como alternativa en algún tipo de acero inoxidable, con un paño MD-Plan. Después del esmerilado fino se realizará un exhaustivo pulido de diamante con un paño de dureza media, (MD-Dac), y el pulido final con sílice coloidal (OP-S) o alúmina (OP-A) para eliminar cualquier pequeño arañazo. Este último paso deberá ser exhaustivo y requerirá varios minutos. Un buen pulido final aumenta las posibilidades de mejorar el contraste. El método también se puede usar en muestras para la evaluación de porosidad de una muestra fabricada con aditivos. En ese caso, se omite el paso final del pulido de óxido, ya

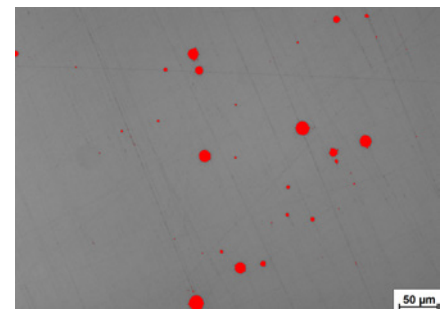


Figura 23. Porosidad medida en acero inoxidable de fabricación aditiva después de un paso de pulido de 3 µm en MD-Dac; sin ataque químico, campo claro. Los arañazos visibles provienen de la suspensión de pulido de diamante de 3 µm.

Equipos:	LectroPol-5
Electrolito:	A3
Área:	1 cm²
Tensión:	35 V
Caudal:	13
Tiempo:	25 s

Tabla 6. Método de preparación para pulido electrolítico de acero inoxidable. Esmerilado inicial en lámina/papel SiC #320, #500 y #1000.



que el pulido de 3 μm en un paño de acetato medio/duro (MD-Dac) revela la verdadera porosidad de la muestra; véase la Fig. 23. Una alternativa al pulido mecánico es el pulido electroquímico, que se realiza con un electrolito basado en ácido perclórico (A3). En la Tabla 6 se muestra un método para la LectroPol-5 de Struers.

Un método para la LectroPol-5 de Struers se muestra en aceros austeníticos y resistentes a la corrosión, así como en superaleaciones de níquel que pueden grabarse con ácidos como el colorante V2A, la solución de ataque Adler (Fig. 25) o reactivos de color como Beraha II o III o Lichtenegger y Bloech. Además, el ataque químico óptico con filtro de contraste diferencial de interferencia puede resultar útil en aceros inoxidables. Véase la Fig. 24 después del pulido de óxido y la Fig. 26 después del ataque electrolítico. El método de ataque electrolítico, que emplea un 10 % de ácido oxálico en el agua, es muy común; véase la Fig. 26 y la Tabla 8. En aceros dúplex, el ataque electrolítico

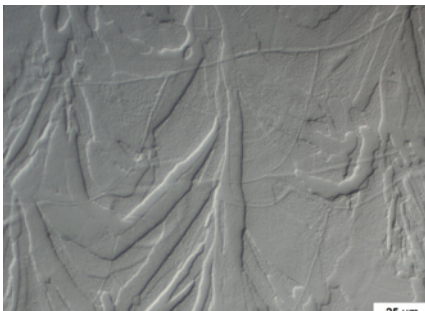


Figura 24. Acero austenítico después del pulido con OP-S en MD-Chem. Estructura visible sin grabado químico. Contraste diferencial de interferencia, DIC.



Figura 25. Inconel 718, sometido a ataque químico con reactivo Adler. Campo claro.

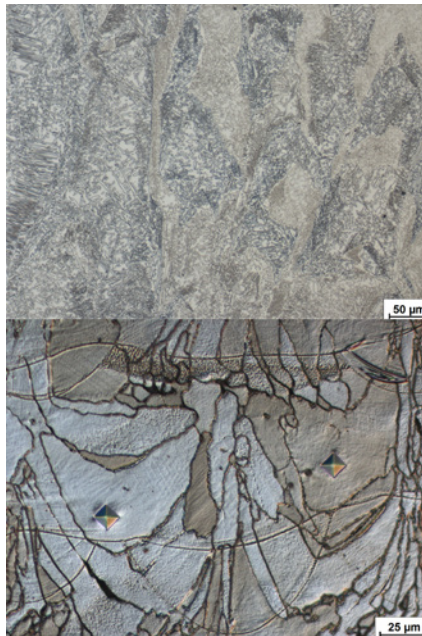


Figura 26. Acero dúplex 1.4462 tras ataque electrolítico con ácido oxálico (10 %). Campo claro (arriba). Acero dúplex con penetradores de microdureza, tras grabado electrolítico con 20 % de NaOH en agua (abajo).

Equipos:	LectroPol-5
Electrolito:	10 % de ácido oxálico acuoso
Tensión:	15 V
Tiempo:	60 s

Tabla 8. Método de preparación para ataque electrolítico de acero inoxidable

con NaOH (20 % en agua) ofrece buenos resultados. La luz polarizada es un método de ataque químico óptico que se puede utilizar después de un grabado adicional especial, como el ácido oxálico para aceros austeníticos, o Adler para superaleaciones a base de Ni; véase la Fig. 25.

Acero de herramientas

El acero de herramientas es un acero de alta aleación con gran cantidad de elementos aleados como cromo, níquel, vanadio, tungsteno o molibdeno. La principal dificultad durante el esmerilado y pulido de aceros para herramientas de alta aleación es garantizar la retención de carburos e inclusiones

Paso		PG	FG	DP 1	DP 2	OP	
	Superficie	MD-Piano 220	MD-Allegro	MD-Dac	MD-Nap	MD-Chem	
	Abra-sivo	Tipo	Diamante	Diamante	Diamante	Diamante	Alúmina
		Tamaño	#220	9 µm	3 µm	1 µm	0,1 µm
	Suspensión / Lubricante	Agua	DiaPro Allegro/Largo 9	DiaPro Dac 3	DiaPro Nap B 1	OP-A	
	rpm	300	150	150	150	150	
	Fuerza [N]/muestra	35	35	35	25	15	
	Tiempo (min)	Según se necesite	9	6	1	1	

Tabla 7. Método de esmerilado y pulido para muestras sin embutir de 30 mm de acero para herramientas



Figura 27. Acero para herramientas 1.2709 después del ataque químico con Klemm modificado (10/3) y adición de HCl

no metálicas. Dependiendo del estado de la microestructura, los carburos pueden fracturarse durante el esmerilado o extraerse de la matriz más blanda durante el esmerilado o pulido.

Para este tipo de metales ferrosos, no se debe tener en cuenta la ductilidad ni la propensión a la formación de manchas o arañazos; véase la Tabla 7. Los discos de esmerilado plano de diamante como MD-Piano se pueden utilizar con una alta eliminación de material. Para el paso de esmerilado fino, se utiliza el disco de

diamante con ligante de metal MD-Allegro con una suspensión de diamante de 9 μm antes de los pasos de pulido de diamante. En aceros para herramientas de alta aleación, se puede utilizar un reactivo Klemm modificado; véase la Fig. 27.

Preparación objetivo

Para los materiales fabricados aditivamente, a menudo resulta de especial interés investigar los atributos microscópicos de la microestructura. Estos objetivos pueden ser poros, grietas o inclusiones del proceso de sinterización láser, así como impurezas de diferentes materiales de materia prima, como polvos; véase la Fig. 29. Si se deben visualizar porosidades y grietas abiertas a la superficie, el uso de resinas epoxi con polvos fluorescentes montadas al vacío es una solución útil; véase la Fig. 28. Calentar el epoxi a 50–60 °C para aumentar la viscosidad y utilizar un enfriamiento activo durante el curado proporciona una muy buena impregnación y una contracción y formación de huecos muy bajas. El uso de tintes fluorescentes requiere una característica especial en el microscopio.

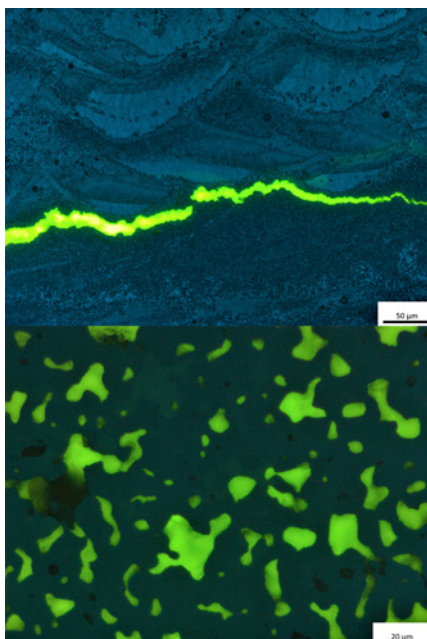


Figura 28. Relleno de una grieta en una aleación de aluminio con resina fluorescente (arriba). Abra la porosidad en acero austenítico (abajo).

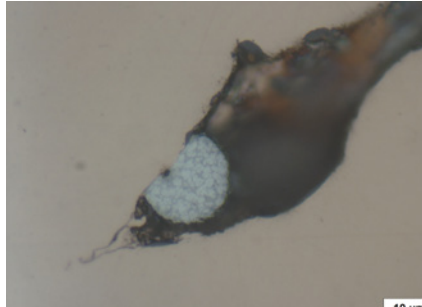


Figura 29. Contaminación de partículas de polvo de AISi en la muestra de CuCrZr1. Campo claro.

Antes de la detección del objetivo por rayos X, la muestra objetivo se fija en un "portamuestras" especial; véase la Fig. 31. La máquina de esmerilado y pulido (Fig. 30) utiliza la ubicación definida del objetivo y un método especial que usa consumibles con eliminación consistente para alcanzar el punto de interés deseado; véase la Fig. 32.



Figura 30. Target Master de Struers para controlar la eliminación de material.

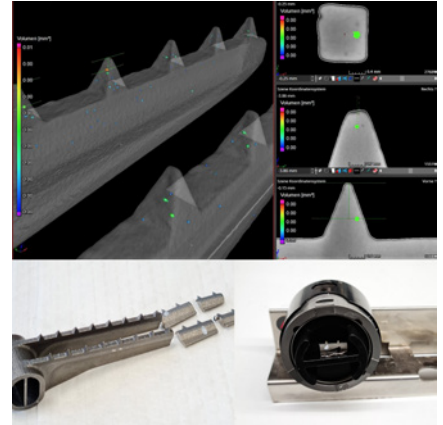


Figura 31. Arriba: Detección por rayos X del poro de mayor volumen (arriba). Corte de la pieza fijada en un soporte específico, Target Grip, y lista para la preparación (abajo).

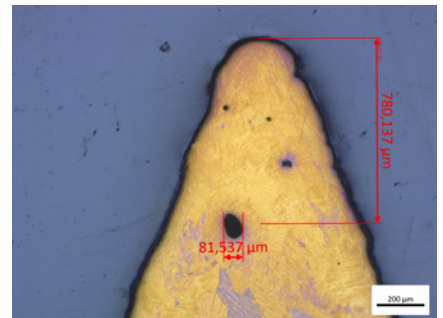


Figura 32. Imagen de microscopio óptico del poro más grande en una aleación de titanio, preparada con el sistema Target. La muestra se sometió a ataque químico con un reactivo de 100 ml de agua, 10 g. NaOH y 10 ml H_2O_2 .



Struers ApS

Pederstrupvej 84
DK-2750 Ballerup,
Dinamarca
Teléfono +45 44 600 800
Fax: +45 44 600 801
struers@struers.dk
www.struers.com

Nota de aplicación

Metalografía de materiales de fabricación aditiva
Nikolaj Kjelgaard Vedel-Smith, Instituto Tecnológico
de Dinamarca, Aarhus, Dinamarca.
Søren Jepsen Mark, Instituto Tecnológico de Dinamarca,
Aarhus, Dinamarca.
Holger Schnarr, Struers GmbH, Willich, Alemania.
Olafur Olafsson Struers ApS, Ballerup, Dinamarca.

Agradecimientos

1. Nuestro agradecimiento al Sr. Bärthel, al Sr. Palm (Airbus München), al Sr. Binczycki (FHG ILT Aachen), al Sr. Hengsbach (University Paderborn), al Sr. Mark (Danish Teknologisk Institut Copenhagen) por el suministro de materiales.
2. Todos los casos de las figuras 1, 3, 4, 5 y 6 los proporciona el Instituto Tecnológico de Dinamarca.
3. Todas las imágenes de la microestructura las proporciona el Dr. Holger Schnarr, Struers GmbH