INTRODUCCIÓN AL PROCESO DE

SHOT PEENING

CYM MATERIALES S.A.
SOLUCIONES INDUSTRIALES

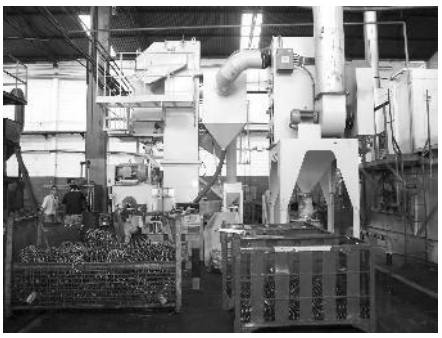
INTRODUCCIÓN

El shot peening es un caso particular dentro de la gama del granallado, mediante el cual se inducen tensiones de compresión en una superficie metálica, exponiéndola a un chorro de partículas esféricas a alta velocidad y manteniendo controlados los parámetros de la operación.

Durante el proceso, además de producir el efecto mencionado, se limpia la superficie como en una tarea normal de granallado, pero este es solo un efecto secundario: el propósito principal es el incremento de la resistencia a la fatiga del material.

Acción de martillado con partículas esféricas

Cuando el abrasivo esférico es impulsado en un flujo de alta velocidad e impacta sobre una superficie metálica, conforma en ella un perfil superficial constituido por valles y crestas redondeadas y produce una deformación plástica del metal. Dicha deformación se puede extender entre los 50 y 250 micrones de profundidad.



El efecto obtenido luego del granallado constituye el aplastamiento de los granos metalográficos de la superficie del metal. Con ello se producen dos efectos:

- Los granos se ensanchan comprimiéndose entre sí y provocando la aparición de tensiones de compresión paralelas a la superficie. Estas tensiones de compresión anulan las tensiones residuales inducidas en procesos anteriores como mecanizado, tratamiento térmico o conformación plástica, y además se oponen a toda solicitación a la tracción a que sea sometida la pieza en una utilización posterior.

- Como efecto secundario, al ensancharse los granos cubren los espacios intergranulares, reduciéndolos considerablemente y, en consecuencia, reduciendo también la velocidad de corrosión galvánica.

- En resumen, el shot peening aumenta la resistencia a la fatiga en piezas sometidas a procesos de flexión y, como efecto secundario, produce un aumento de la resistencia a la corrosión y la eliminación de tensiones residuales, induciendo una tensión de compresión uniforme en toda la superficie, además de limpiarla mediante el granallado.

Principales aplicaciones

El proceso de shot peening se utiliza principalmente en componentes sujetos a esfuerzos de flexión o torsión. Estas son las aplicaciones más comunes:

- Componentes de aeronaves
- Compresores axiales
- Levas y cigüeñales
- Ejes, piñones y coronas de caja de cambios
- Pernos y barras laterales de cadenas
- Diafragmas o discos de embragues
- Componentes de minería
- Taladradores de roca
- Varillas de pistón
- Barras de torsión
- Resortes helicoidales, de válvulas, ballestas, etc.
- Componentes para la industria del petróleo:
  - Varillas de bombeo (sucker rods)
  - Conexiones de tubos roscados
  - Ejes de herramientas de perforación vertical

EQUIPOS DE SHOT PEENING

Los equipos utilizados para efectuar shot peening son esencialmente similares a los empleados para otras tareas de granallado, con el agregado de una instalación auxiliar que permite realizar el más estricto control de los parámetros de ejecución.

En cuanto a la impulsión de la granalla, se utilizan dos métodos:

- Turbina centrífuga: impulsa la granalla a alta velocidad mediante una combinación de fuerzas radial y tangencial. Las ventajas del método incluyen la facilidad en el control de la velocidad y la alta capacidad de producción.
- Aire comprimido: un flujo de aire a alta velocidad arrastra e impulsa las partículas. Este método se recomienda cuando se trabaja con bajas producciones o con tratamientos localizados, porque permite desarrollar altas velocidades de impacto y dirigir el flujo en forma precisa hacia agujeros, cavidades, curvas de pequeño radio, raíces de dientes de engranajes y piezas de formas intrincadas.

El reciclaje de la granalla es de vital importancia. Durante la operación es necesario separar las esferas que no han sufrido deterioro y son reutilizables del polvo desprendido y de las partículas de abrasivo fracturado. Además, es recomendable contar con un sistema automático de reposición continua de abrasivo.

Es importante para la uniformidad del tratamiento disponer de sistemas de movimiento que permitan a las piezas una total exposición frente al flujo de abrasivo.

Otros elementos adicionales son las máscaras, que se utilizan cuando el tratamiento debe ser selectivo y solo se dejan expuestas las zonas a tratar.

Para la utilización de microesfera de vidrio se emplean equipos en medio seco o líquido. Los de medio seco son generalmente del tipo de proyección por succión, mientras que los de medio líquido utilizan una bomba de impulsión y homogeneización. Debido al gran porcentaje de fractura de las microesferas de vidrio, es necesaria una alta eficiencia en el equipo separador y recuperador de abrasivo.

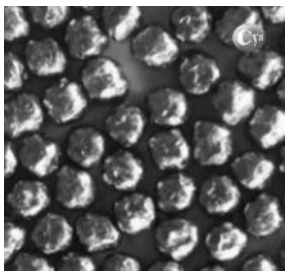
ABRASIVOS UTILIZADOS EN PROCESOS DE SHOT PEENING

Con la única limitación de la conformación exterior esférica, los abrasivos más utilizados en procesos de shot peening son los siguientes:

Granalla de acero fundida esférica, al carbono o inoxidable

Es un abrasivo ampliamente utilizado: mediante el adecuado tratamiento térmico impuesto durante su fabricación combina un buen valor de dureza con una capacidad de rotura aceptable, y su costo es menor al de la granalla de alambre. Los tamaños, tamizados según sus distintas granulometrías y clasificados, se encuentran normalizados en el estándar SAE J444.

Granalla de alambre cortado acondicionado (CCW)



Es el abrasivo que más aceptación está teniendo actualmente en el mundo, debido a que tiene una excelente dureza con muy bajo nivel de rotura. Eso implica un consumo de abrasivo relativamente bajo y, sobre todo, mantiene un nivel de granulometría constante en un porcentaje elevado de partículas. Los tamaños, según sus distintas granulometrías y clasificados, se encuentran normalizados en el estándar SAE J441.

Granalla de fundición de hierro esférica y nodular

Comprende las granallas de fundición gris, blanca y maleable. Se utilizan en aquellos casos donde se requiere efectuar un trabajo de shot peening de bajo costo inicial, debido al bajo costo relativo de esta granalla, a pesar de tener una vida útil muy inferior a las de acero por su mayor fragilidad. En shot peening la rotura del abrasivo adquiere una gran importancia, ya que es imprescindible que el impacto sobre la superficie lo realice una partícula esférica, algo que se torna difícil de controlar utilizando un abrasivo con alta fractura.

Las granallas de fundición nodular se utilizan en escala muy limitada, pues debido a su baja dureza las intensidades logradas son pobres y además dejan residuos de grafito en las piezas granalladas.

Microesferas de vidrio (glass bead) o cerámica

Se utilizan para el conformado de chapas delgadas, logrando valores de intensidad bajos. Se emplean para hacer shot peening en chapas de acero inoxidable o en materiales no ferrosos que no puedan ser contaminados con abrasivos de acero al carbono.

Los cuatro abrasivos, comparados

Abrasivo	Característica	Norma	Nota
Granalla de acero fundido (esférica)	Buena dureza y resistencia aceptable a la rotura	SAE J444	Más económica; al desgastarse se fractura, lo que exige clasificar con más frecuencia
Alambre cortado acondicionado (CCW)	Muy baja rotura; conserva la forma esférica hasta el final de su vida útil	SAE J441	Mayor durabilidad y mix operativo más estable
Fundición de hierro	Alta fragilidad: se fractura con facilidad	—	Poco apta para shot peening. La nodular, prácticamente descartada
Microesfera de vidrio (glass bead)	Intensidades bajas, conformado de chapa fina	—	Para inoxidable y no ferrosos que no deben contaminarse con acero

VARIABLES DEL PROCESO

Las variables más importantes en el proceso de shot peening son las siguientes:

- Tamaño y dureza del abrasivo
- Velocidad adquirida
- Intensidad del proceso
- Densidad de impactos en la superficie (factor de cobertura)
- Ángulo y distancia de proyección
- Porcentaje de rotura del abrasivo

La efectividad y la calidad del shot peening dependen del control eficiente de cada una de las variables mencionadas.

Tamaño de la granalla

Este factor incide en la energía cinética adquirida, que se transformará en energía de deformación —elástica y plástica— en el instante del impacto. Mientras la velocidad y el tiempo de exposición se mantengan constantes, todo incremento del tamaño de la partícula implica un incremento en la intensidad del proceso y una menor densidad de impactos. Siempre se selecciona el menor tamaño de partícula esférica que produzca la intensidad deseada, logrando de esa forma la mayor rapidez del proceso y la mejor cobertura. Además, en la elección del tamaño debe influir la configuración de la pieza a tratar, teniendo en cuenta sus menores radios de curvatura, de forma tal que los diámetros de la partícula sean dimensionalmente compatibles con ellos.

Dureza de la partícula

Siempre que la dureza de la partícula sea mayor que la de la superficie, esta no influye en la intensidad del proceso. Sin embargo, se debe seleccionar una partícula cuya dureza sea solo algo superior, porque si es extremadamente dura será frágil y tendrá un porcentaje de roturas alto. Si en cambio la dureza de la partícu-

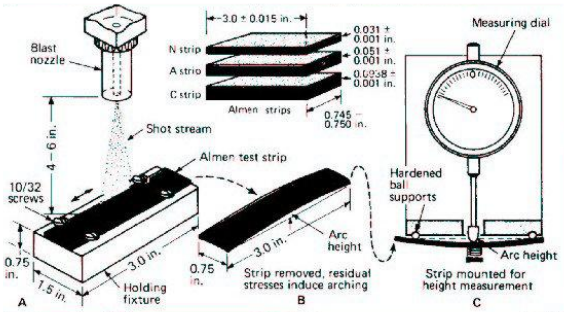
la es inferior a la de la superficie, cuanto más blanda sea, menor será la intensidad lograda.

Velocidad de la partícula

Desde el punto de vista energético, al aumentar la velocidad de la partícula aumenta su energía cinética y, por lo tanto, aumenta con ella la intensidad del shot peening. En la práctica, ese incremento de velocidad produce además un mayor porcentaje de fracturas de partículas, lo que impide el crecimiento teórico de la intensidad.

Intensidad del proceso

La intensidad del shot peening se mide mediante un ensayo normalizado, en base a la curvatura experimentada por una lámina sometida al impacto del flujo de partículas esféricas. Se denomina ensayo Almen y se explicita en la sección correspondiente. Al someter una cara de una chapa relativamente delgada al flujo de partículas esféricas se produce, como ya se mencionó, un efecto de martillado sobre la superficie, con el consiguiente ensanchamiento por compresión de los granos metalográficos de dicha superficie.



Ese ensanchamiento provoca un aumento del área de la superficie granallada, quedando la cara opuesta con el área original y produciendo por ese motivo la curvatura de la chapa, que será función de la intensidad del granallado aplicado. Por ello la intensidad del shot peening se mide en base a la altura del arco experimentado por la lámina granallada en condiciones normalizadas. Suponiendo una densidad máxima de impactos (saturación), la intensidad dependerá de la velocidad, el tamaño y la dureza de la partícula esférica proyectada, y del ángulo y la distancia de proyección.

La menor intensidad capaz de producir los efectos deseados es la más eficiente y la de menor costo, porque se trabaja con la partícula de menor tamaño y se realiza el proceso en el menor tiempo de exposición. Otro factor importante es el espesor de la zona que adquiere las tensiones de compresión luego del shot peening: esa profundidad dependerá de la intensidad del proceso y de la dureza del material tratado.

Ángulo y distancia de proyección

Es el ángulo formado entre la superficie y la dirección del flujo de partículas: 90º en la vertical, y disminuye hacia ambos lados. Al reducirse el ángulo de proyección disminuye la intensidad del shot peening. En los casos en que el ángulo deba ser inferior a 90º por necesidades prácticas, para mantener el valor de intensidad

deseado debe incrementarse el tamaño de la partícula o su velocidad. En cuanto a la distancia, la intensidad disminuye a medida que esta aumenta, por lo que debe fijarse un valor y mantenerlo durante todo el proceso.

Porcentaje de rotura

Debido a la necesidad de que solo impacten partículas esféricas sobre la superficie a tratar, las partículas rotas deben extraerse del circuito de forma automática y rápida. El porcentaje de abrasivo esférico no debe ser inferior al 85 %, y para mantener determinadas intensidades son necesarios porcentajes aún mayores.

Densidad de impactos

Es una medida que indica en qué grado el área tratada ha sido impactada por las partículas esféricas, y se conoce como factor de cobertura. Se logra la saturación de esa densidad de impactos cuando el factor de cobertura es cercano al 100 %. Para factores de cobertura inferiores, el tratamiento de shot peening no otorga la resistencia a la fatiga deseada.

Hay una relación directa entre el factor de cobertura y el tiempo de exposición, dada por:

$Cn = 1 - (1 - C_1)^n$, donde:

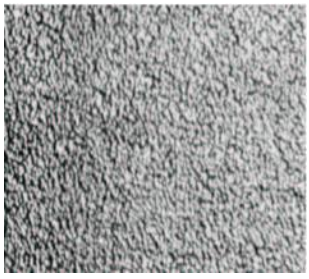
C_1 = factor de cobertura (%) para un ciclo de impactos

Cn = factor de cobertura (%) luego de n ciclos de impactos

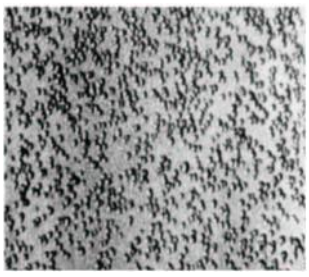
n = número de ciclos

La relación indica que el factor de cobertura tiende al 100 % a medida que aumenta el número de ciclos.

Cobertura Total



Cobertura Parcial



Es difícil efectuar la medida precisa de factores de cobertura por encima del 98 %. Por eso se mide una probeta con un factor de cobertura inferior, se la relaciona con el tiempo de exposición correspondiente y se calcula el tiempo necesario para alcanzar el factor de cobertura deseado. Como la medición solo puede realizarse con precisión hasta el 98 %, ese valor se toma arbitrariamente como valor de saturación. A partir de allí, el factor de cobertura se expresa en función del

tiempo de exposición, como un múltiplo del tiempo requerido para obtener la cobertura del 98 %.

Existen varios métodos para medir el factor de cobertura. El más utilizado consiste en lo siguiente:

- Realizar un pulido espejo en la probeta a granallar.
- Someter esa superficie al flujo de abrasivo en condiciones predeterminadas.
- Retirar la probeta y proyectar la superficie expuesta en un comparador con 50 aumentos.
- Sobre esa proyección, y en un papel transparente, trazar las marcas producidas por los impactos, bien diferenciadas de las zonas pulidas. Medir la superficie impactada encerrada por las marcas circulares: la relación entre esa superficie y la superficie total, expresada en porcentaje, es el factor de cobertura obtenido.

Resumen: qué controla cada variable

Variable	Efecto sobre el proceso	Criterio de control
Tamaño de la granalla	Mayor tamaño → más intensidad, menos densidad de impactos	El menor tamaño que logre la intensidad buscada; compatible con el menor radio de la pieza
Dureza de la partícula	Si es más blanda que la superficie, cae la intensidad	Solo algo más dura que la superficie; si es muy dura, se fragiliza y rompe
Velocidad de la partícula	Mayor velocidad → más intensidad	El exceso aumenta la fractura y frena la ganancia real
Intensidad del proceso	Resulta de las demás variables; se mide con el ensayo Almen	La menor intensidad que produzca el efecto buscado: menos tiempo de exposición y menor costo
Ángulo de proyección	90º da máxima intensidad; menos ángulo la reduce	Si debe ser menor a 90º, compensar con tamaño o velocidad
Distancia de proyección	A mayor distancia, menor intensidad	Se fija un valor y se mantiene durante todo el proceso
Porcentaje de rotura	Las partículas rotas bajan la intensidad	El abrasivo esférico no debe bajar del 85 %; extraer las rotas del circuito
Densidad de impactos	Por debajo de la saturación no se obtiene la resistencia a la fatiga buscada	Se controla con el tiempo de exposición; el 98 % se toma como valor de saturación

MEDICIÓN DE INTENSIDAD — ENSAYO ALMEN

El ensayo Almen es el método normalizado por el estándar SAE J442 para la medición de la intensidad del shot peening. El efecto que se utiliza para la medición es la curvatura producida en una lámina delgada sometida al flujo de partículas esféricas en condiciones normalizadas.

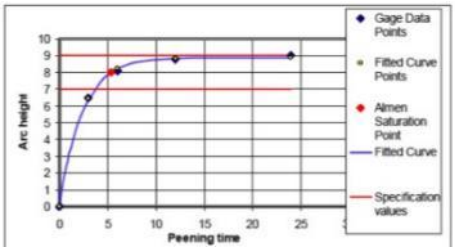
El ensayo se expresa en tres rangos de intensidad —N, A y C—, y para cada uno difiere el espesor de la probeta de medición según el rango a medir.

El instrumento de medición consta de un reloj comparador graduado en milésimas de pulgada (0,025 mm), con una base perpendicular a la barra de medición y cuatro bolillas de apoyo que forman el plano sobre el cual se apoya la probeta. Dicha probeta se curva durante el proceso de shot peening y se mide la altura de la combinación de curvatura longitudinal y transversal sobre la cara no granallada.

La medición se indica mediante el número Almen que marca el comparador y la letra de la probeta correspondiente. Así, 13 A indica que, en el ensayo Almen con probeta A, la intensidad obtenida es 13.

En la práctica, la elección del rango depende del espesor de la pieza y de la intensidad que exija su especificación.

Para efectuar la medición se procede de la siguiente forma:



1. Exponer la superficie de la probeta al flujo de partículas en las condiciones normales de trabajo y medir el tiempo de exposición.
2. Retirar la probeta de la base y medir con el comparador Almen la altura de la curvatura, con el instrumento previamente puesto a cero.
3. Repetir los dos pasos anteriores con distintos tiempos de exposición, para determinar una curva como la de la figura.
4. El punto de saturación aceptado en la industria se identifica cuando, al duplicar el tiempo de exposición, el incremento en la altura del arco no supera el 10 %.

EFECTOS DEL SHOT PEENING

La aplicación fundamental del tratamiento de shot peening es el aumento de la resistencia a la fatiga de distintos elementos. Otras utilizaciones secundarias son las siguientes:

Resistencia a la fatiga

Las piezas sometidas a shot peening experimentan una considerable elevación de la resistencia a la fatiga, en especial elementos como resortes, flejes, engranajes y barras, y herramientas como fresas, mechas, punzones y matrices.

Conformación de metales

El shot peening es adecuado para ciertas operaciones de conformación de chapas delgadas. Se usa particularmente en componentes estructurales para la industria aeronáutica, como las chapas de fuselaje. Si dichas curvaturas se realizaran por métodos de conformación mecánica en frío o en caliente, las chapas adquirirían tensiones residuales muy altas e inadecuadas para las funciones a cumplir.

Eliminación de tensiones residuales localizadas

Es el caso de piezas que han quedado tensionadas luego del tratamiento térmico, de conformación o de mecanizado. Mediante la aplicación del shot peening se eliminan las tensiones residuales de tracción, uniformando una tensión de compresión en toda la superficie.

Aumento de la resistencia a la corrosión

La resistencia a la corrosión de un metal sometido a shot peening aumenta debido a la disminución de los espacios intergranulares de la superficie, y también debido a la eliminación de tensiones residuales de tracción, que aumentan la energía del sistema y con ella la posibilidad de corrosión.

Prueba de adhesión de láminas de plata

La adhesión de láminas de plata sobre aceros, de gran utilidad en ciertos procesos, es efectiva cuando se logra un excelente anclaje entre ambos. Una forma de medirla es someter el conjunto al tratamiento de shot peening: en las zonas donde dicho anclaje es pobre, la lámina de plata se deformará y dejará ondulada la superficie.

Procesos posteriores al shot peening

Las piezas tratadas mediante shot peening no pueden ser sometidas posteriormente a deformaciones mecánicas, calentamientos —salvo los muy leves—, mecanizados ni pulidos, debido a que la capa superficial que adquirió las tensiones de compresión es de muy bajo espesor. Solo se admite como tratamiento posterior un pasivado de la superficie como prevención de la corrosión.

NORMAS SAE Y BIBLIOGRAFÍA

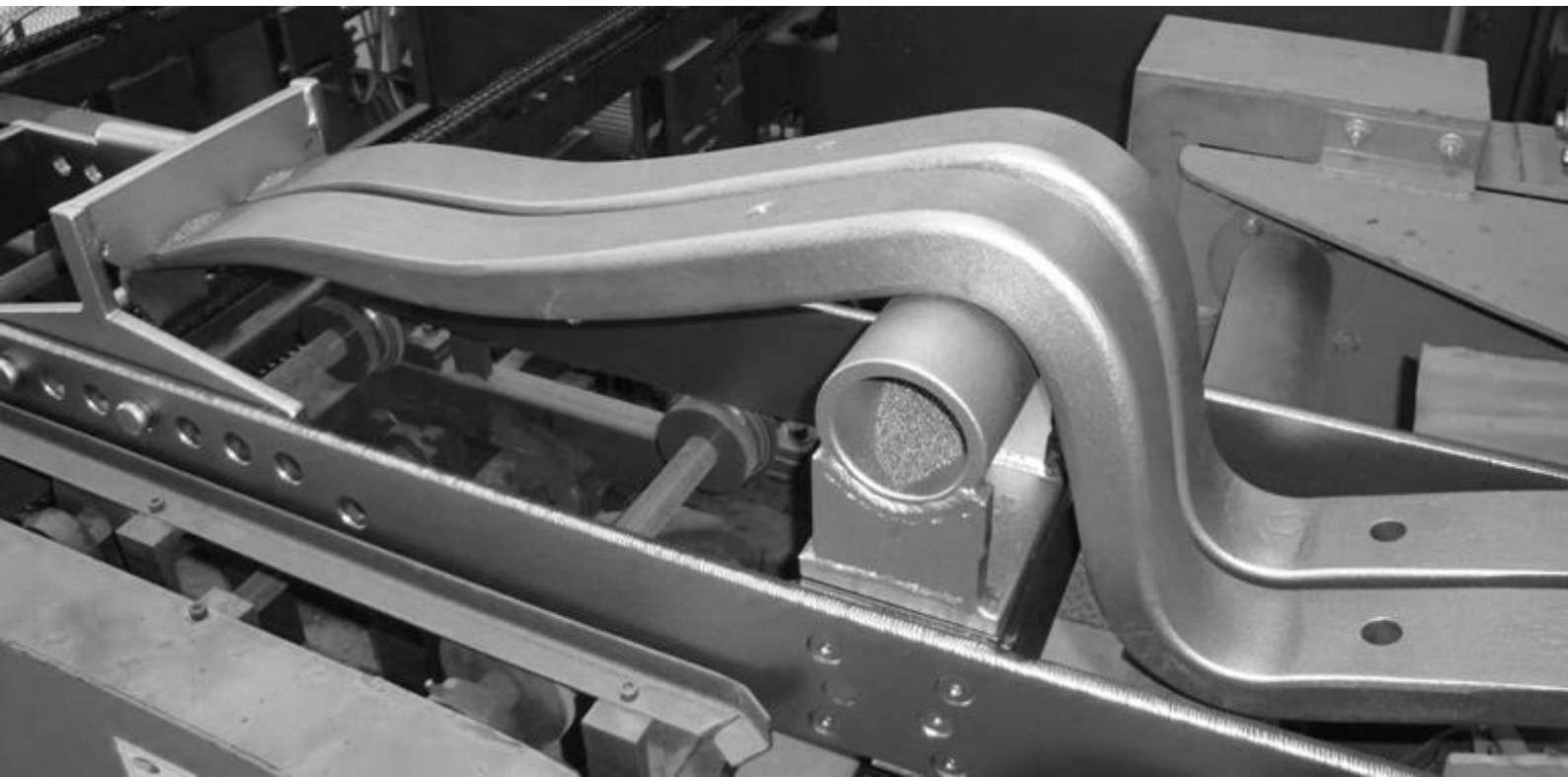
Para ampliar información pueden consultarse las normas SAE J441, SAE J442, SAE J443, SAE J444, SAE J445 y SAE J827, o el manual SAE HS-84, Manual on Shot Peening.

EQUIPOS

CYM Materiales diseña y fabrica en Argentina equipos de shot peening por turbina y por aire comprimido: mesas giratorias, satélites indexados, equipos para engranajes, piñones y coronas, resortes helicoidales y ballestas, roscas de tubos de perforación y shot peening localizado con manipuladores y robot.

El departamento de Ingeniería desarrolla además equipos a medida a partir de un relevamiento técnico del proceso del cliente.

CYM Materiales S.A. · Departamento de Ingeniería · Agosto de 2026



CYM MATERIALES S.A.
SOLUCIONES INDUSTRIALES

ADMINISTRACIÓN Y FÁBRICA

Brig. Estanislao López Nº 6
[S2108AIB] Soldini – Santa Fe – Argentina
+54 341 490 1100
+54 9341 5150249
info@cym.com.ar
https://cym.com.ar