IPAR BLAST, S.L.

The Shot Peener's Corner

Nº 36

IPAR-BLAST, S.L. Parque Industrial Itziar-Deba, Parcela 4, Pabellón F2-5 20829 ITZIAR (Gipuzkoa)

The Shot Peener's Corner es una colaboración entre ELECTRONICS INC. e IPAR-BLAST, S.L.
Cada artículo, es una traducción del reportaje más destacado de la revista THE SHOT PEENER.
ELECTRONICS INC. es líder mundial en formación y difusión del shot peening.
IPAR-BLAST, S.L. es subcontratista de tratamientos superficiales de precisión. Entre los cuales se encuentra el shot peening.

De vuelta a los principios: Cálculos en Shot Peening

Dr. David Kirk | *Coventry University* (Texto traducido por Eduardo Vázquez — IPAR-BLAST, S.L.)

INTRODUCCIÓN

La capacidad de cuantificar sus variables ha permitido que el shot peening evolucione hacia un proceso tecnológico inteligente. Los cálculos, son ahora una parte inevitable en el shot peening. Cada cálculo tiene dos componentes. El primero es una ecuación y el segundo son datos para sustituir en la ecuación. Como ejemplo trivial, considérese el cálculo del pago por el trabajo realizado en función de una tarifa por hora fija. La ecuación es simplemente, el pago es igual a la tarifa por hora multiplicada por el tiempo trabajado. A 30 € por hora, trabajar durante 10 horas supondrían 300 €. Este sencillo ejemplo también destaca una característica muy importante de los cálculos. ¡Las unidades deben estar equilibradas! Cada cálculo implica una ecuación secundaria. Para este ejemplo, la tarifa por hora es de 30 € dividido por una hora, por lo que multiplicar por horas cancela la unidad horaria para dejar, correctamente, el pago como solo en euros.
Este artículo reúne muchas de las grandes cantidades de ecuaciones utilizadas en artículos anteriores de Shot Peener. El objetivo es tenerlos todos disponibles en un solo lugar. Algunas de las ecuaciones son simples, pero algunas son complicadas y fueron desarrolladas por el autor. Las propiedades de la granalla antes de que golpee un componente se tratan en la Parte 1 y los efectos después de golpear un componente se tratan en la Parte 2.

PARTE 1

DIMENSIONES DE LA GRANALLA

La dimensión básica de la granalla es, por supuesto, su diámetro, D, como se describe en las especificaciones estándar. Esto nos permite calcular otras dimensiones. Por lo tanto:

Área de superficie de una partícula de granalla = πD^2 (1)
Volumen de cada partícula de granalla = $\pi D^3/6$ (2)

La masa de partícula es el volumen multiplicado por la densidad, ρ, donde la densidad es la masa (en kg) por metro cúbico, por lo que:

Masa de partícula = $\rho\pi D^3/6$ (3)

El número de partículas por kilogramo es de 1 kilogramo dividido por la masa de cada partícula en kg, tenga en cuenta la cancelación de la unidad. Esto produce:

Partículas por kilogramo = $6/\rho\pi D^3$ (4)

Para ilustrar estas cuatro dimensiones básicas, supongamos que una partícula de acero en particular tiene un diámetro, D, de 1 mm.

Redondeo **π** para tener un valor de 3, (1) nos dice que el área de esta partícula es de 3 mm^2 y (2) nos dice que su volumen es de 0,5 mm^3. Tenemos que tener cuidado con las unidades para la ecuación (4). La densidad del acero es de aproximadamente 7800 kgm^{-3}. 1 mm es igual a 10^{-3} m. Sustituyendo en la ecuación (4) se obtiene, para partículas de acero de 1 mm de diámetro (aproximadamente S390): partículas por kilogramo

= 2/7800 * 10^{-9}. Usando una calculadora da 256.400. ¡La granalla más pequeña, por ejemplo, S110, tiene más de once millones de partículas por kilogramo! Conocer el caudal en kg por minuto, las partículas por kg y el diámetro del haz de granalla nos permite estimar la tasa de cobertura.

VARIABILIDAD DE LA DIMENSIÓN DE LA GRANALLA

Diferentes lotes de un tipo dado de granalla contienen un rango de distintos diámetros. Esta variabilidad debe cuantificarse si queremos mantener el control de la calidad de la granalla. Los tamaños nominales de granalla son cantidades fijas, mientras que las muestras reales contienen una gama de tamaños. La granalla de alambre cortado tiene un rango de diámetros mucho más pequeño que la granalla de acero fundido. El rango depende de la variabilidad de la producción y los procedimientos de detección asociados. Los lotes de granalla exhiben una variabilidad que se aproxima a lo que se llama una "Distribución Normal". Una curva de distribución normal típica se muestra como fig.1. Cuanto más nítida es la curva, menor es la variabilidad. Una medida cuantitativa de nitidez es el ancho de la curva a la mitad de su altura (WHH). Para obtener una curva razonable para una muestra de granalla, necesitamos un gran número de mediciones. Esto solo es factible si utilizamos una técnica como el análisis de imágenes en una monocapa de partículas de granalla. Las estimaciones de diámetro se agrupan en "contenedores", cada contenedor contiene un rango de diámetros de granalla. Las herramientas de análisis informático para estas distribuciones de contenedores están fácilmente disponibles, por ejemplo, en Microsoft Excel.

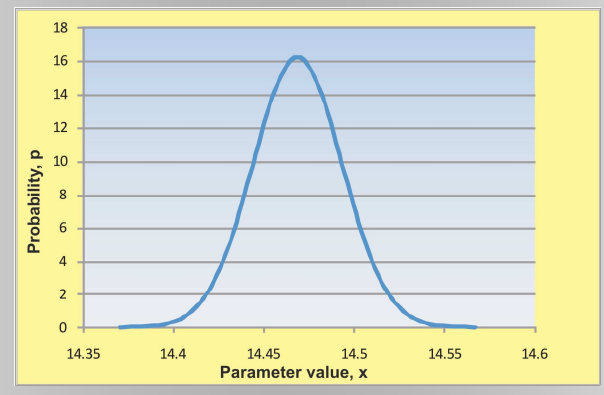

Fig.1. Curva de distribución normal.

Las curvas de distribución normales son particularmente relevantes para la variabilidad de la granalla de alambre cortado. El alambre de un diámetro fijo se corta para formar cilindros que luego se convierten en formas casi esféricas utilizando un proceso llamado "acondicionamiento". El acondicionamiento bien controlado conduce a una curva más estrecha que el acondicionamiento mal controlado.

VELOCIDAD DE LA GRANALLA

La velocidad de las partículas disparadas es de suma importancia para los aplicadores de shot peening. Es el único factor que podemos variar directamente. Otros factores, como la longitud de la boquilla, la granalla y el mecanismo de alimentación de la granalla tienden a ser fijos. Debido a su importancia, se han desarrollado ecuaciones que muestran cómo se puede controlar la velocidad. Se aplican diferentes ecuaciones a las técnicas de aire comprimido y turbina.

1 - VELOCIDAD DE GRANALLA CON AIRE COMPRIMIDO

Para un sistema de shot peening de aire comprimido dado, el principal parámetro de control de la velocidad es la presión del aire. La efectividad de los cambios de presión de aire depende, en cierta medida, del sistema de alimentación de granalla que se emplee: succión, gravedad o directo. El aire comprimido proporciona el mecanismo de propulsión que acelera las partículas disparadas. La compresión aumenta la densidad del aire. Esto se ilustra en la fig.2. El efecto del aumento de la presión del aire se puede visualizar mediante la siguiente analogía. Considere caminar con un viento en contra (densidad 1 kgm^{-3}) de 10 km / hora. No hay problema. Ahora imagine tratar de caminar contra una pared de agua (densidad 1000 kgm^{-3}) moviéndose a 10 km/hora. Ud. sería literalmente barrido. Podemos decir que, la fuerza propulsora aumenta con el aumento de la densidad.

La velocidad de la granalla con aire comprimido es tan importante que se dedicó todo un artículo al tema (TSP, Winter, 2007). Se presentó una ecuación que permitió predecir los efectos de variables como el tamaño y la densidad de la granalla, la presión de aire impuesta y la longitud de la boquilla. Es importante recordar que se debe usar la presión de aire aplicada en la boquilla en lugar de la del compresor de aire. La presión cae a lo largo de la manguera debido a factores como la longitud, el diámetro y la condición de la manguera. La forma más fácil de usar la ecuación predictiva es construir una plantilla de Excel, como se indica en la Tabla 1. La velocidad de la granalla requerida, **v**, en C11, se calcula utilizando la siguiente fórmula de formato Excel:

C11=C9*((1.5*C3*C5*C4*C8)/(π*C6*C7))^0.5/(1+((1.5*C3*C5*C4*C8)/(π*C6*C7))^0.5) (5)

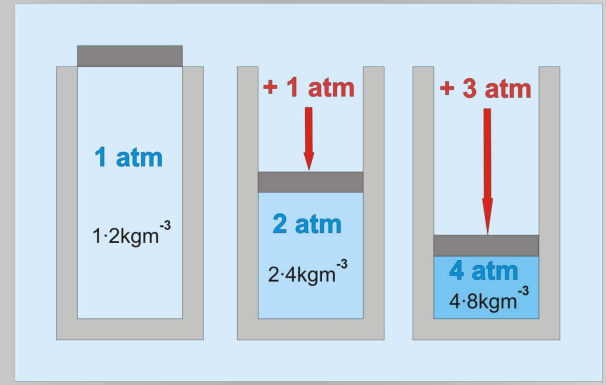

Fig.2. Efecto de la presión aplicada sobre la densidad del aire.

La Tabla 1 muestra un ejemplo del empleo de la ecuación (5) usando Excel. Tenga en cuenta que la velocidad del aire se fija en 200 ms^{-1} para todas las presiones de aire. Esto se debe a que, fijando la velocidad del aire a un valor máximo, se produce lo que se llama un "flujo ahogado".

Tabla 1. Cálculo de muestras mediante ecuación (5)

1	B	C	D
2	**Parámetro**	**Valor**	**Unidades**
3	CD	0.5	
4	Densidad del aire	1.2	kgm^{-3}
5	Presión atmosférica	9	cajero
6	Densidad de granalla	7860	kgm^{-3}
7	Diámetro del granalla	0.25	mm
8	Largura	50	mm
9	Velocidad del aire	200	$m.s^{-1}$
10			
11	**Velocidad de granalla**	**62.4**	**$m.s^{-1}$**

La Fig.3 presenta el factor más importante en el control del shot peening con aire comprimido. Las presiones de aire aplicadas prácticamente son siempre de al menos 2 atmósferas. Eso significa que la velocidad media del aire de la boquilla es constante a unos 200 metros por segundo. Por lo tanto, lo único que se ve influenciado es la densidad del aire en la boquilla. Si tanto la velocidad del aire de la boquilla como la densidad del aire variaran al mismo tiempo, tendríamos que hacer malabares con la dualidad.

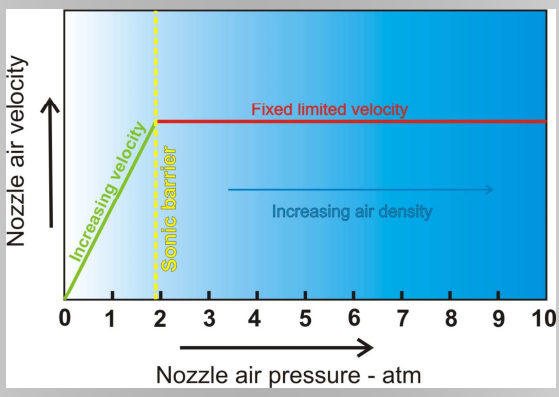

Fig.3. Efecto de la presión de aire aplicada sobre la velocidad del aire de la boquilla.

Excel también se puede emplear para producir gráficos de predicción de la velocidad de la granalla, como los de la fig.4.

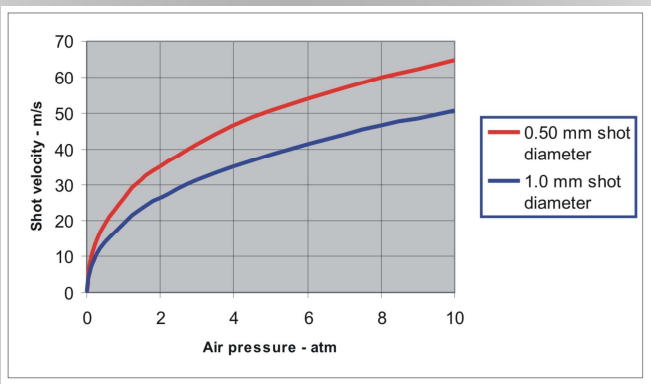

Fig.4. Variación prevista de la velocidad de granalla con el tamaño y la presión de aire aplicada.

A medida que la granalla acelerada sale de la boquilla, siempre viaja mucho más lento que el aire que la rodea. Esto significa que la granalla continúa acelerando hasta que alcanza un máximo a unos 200 mm de la boquilla. A partir de entonces, la granalla viaja más rápido que el aire circundante, por lo que se ralentiza. Por lo tanto, el uso más eficiente de la energía es emplear el haz de granalla a su "distancia ideal" de la superficie de un componente.

2 - VELOCIDAD DE GRANALLA CON TURBINA

Una buena comprensión de la velocidad en una turbina, se basa mejor en el conocimiento de cómo se genera la velocidad en ella. La Fig.5 es una representación esquemática de los componentes principales de una turbina tradicional.

El difunto Jack Plaster comparó una máquina de turbina con un picador de pimienta gigante. Ampliando esa analogía, piense en los granos de pimienta (partículas disparadas) que se alimentan por gravedad en una serie de ranuras en un acelerador. El acelerador gira a alta velocidad, por lo que impone una fuerza centrífuga presionando la granalla contra una jaula de control estática, friccionando hasta que puedan escapar a través de la ranura de salida y ser lanzados por la paleta.

A medida que una partícula disparada se lanza desde el extremo de una paleta, se le dan dos componentes de velocidad: **1. Componente de velocidad tangencial, V_T** y **2. Componente de velocidad radial, V_R**. Los dos componentes constituyen vectores en ángulo recto entre sí, de modo que la velocidad combinada de la partícula disparada, V_S, se obtiene fácilmente utilizando el teorema de Pitágoras. El teorema de Pitágoras es el que dice: "El cuadrado de la hipotenusa es igual a la suma de los cuadrados de los dos lados en ángulo recto". Entonces, si los dos lados tuvieran longitudes de 3 y 4, el cuadrado de la hipotenusa sería igual a 9 + 16 = 25, lo que daría como resultado que la longitud de la hipotenusa sea 5. La Fig.6 ilustra este principio cuando se aplica a la velocidad de la granalla en una turbina.

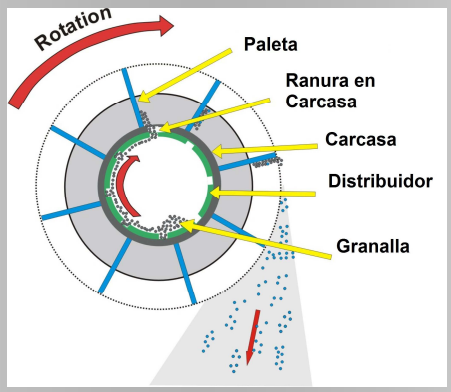

Fig.5. Componentes de una turbina.

1. Componente de velocidad tangencial, V_T

En un giro de 360°, la punta de la paleta habrá recorrido una distancia π.2R, la circunferencia del círculo. Multiplicamos esa circunferencia por N, el número de revoluciones por segundo (r.p.s.) para dar el valor requerido de $\mathbf{V_T}$ como:

$$\mathbf{V_T = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot N} \quad (6)$$

Como ejemplo, si la circunferencia de la rotación de la punta de la paleta es igual a 1 m y N = 50 r.p.s., entonces $V_T = 50\ m.s^{-1}$.

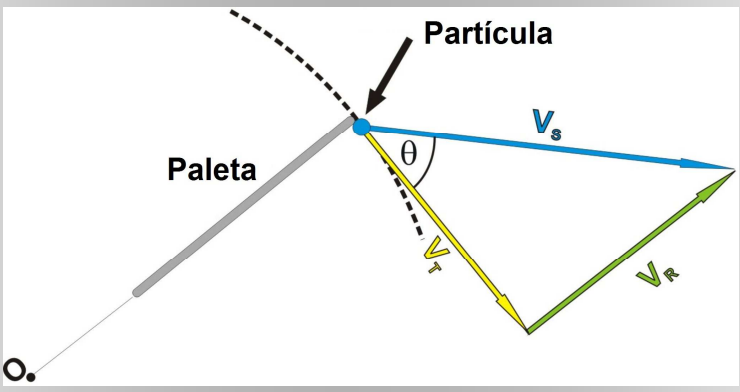

Fig.6. Velocidad de granalla en turbina, V_S, basada en sus dos componentes.

2. Componente de velocidad radial, V_R

La fuerza centrífuga empuja una masa de granalla hacia el extremo de las paletas giratorias. La velocidad, $\mathbf{V_R}$, impuesta a cada partícula lanzada viene dada por:

$$\mathbf{V_R = 2\pi\ N(2.R.L\text{-}L^2)^{0.5}} \quad (7)$$

Donde **L** es la longitud de la paleta (ver fig.5).

Velocidad combinada de la granalla en una turbina, V_S

La velocidad combinada de la granalla en una turbina, se obtiene tomando la raíz cuadrada de $V_T^2 + V_R^2$. Por lo tanto: V_S

$$V_S^2 = (2.\ \pi R.N)^2 + (2\pi N)^2.\ (2.R.L-L^2) \text{ que se simplifica para dar}$$
$$V_S^2 = (2\pi N)^2(R^2+2.R.L - L^2) \text{ de modo que}$$
$$V_S = (2\pi N)(R^2+2.R.L - L^2)^{0.5} \quad (8)$$

Para una turbina dada, **R** y **L** son cantidades fijas y conocidas que dejan solo **N** como nuestro parámetro de control de velocidad. Por ejemplo, supongamos que se sabe que **R** y **L** son 0,25 m y 0,15 m respectivamente. La ecuación (8) luego se simplifica a: $V_S = 2.13.N$. A 40 r.p.s., esa turbina acelerará la granalla a 85,2 metros por segundo.

El ángulo, θ, al que se lanza la granalla desde la paleta se encuentra sabiendo que:

$$\tan \theta = V_R/V_T \quad (9)$$

Si $V_R = V_T$ entonces $\tan \theta = 1$ de modo que $\theta = 45°$.

PARTE 2

Esta parte considera los efectos cuantificables de la granalla que golpea un componente. Estos son el tamaño de la huella, la cobertura y la intensidad de shot peening.

TAMAÑO DE LA HUELLA

El granallado produce huellas en la superficie de los componentes. La abundancia de huellas es la indicación más obvia de que se ha llevado a cabo el shot peening. Las características importantes son el tamaño promedio de la huella y el alcance de la cobertura de la huella. El tamaño de la huella está directamente relacionado con la intensidad del shot peening y, por lo tanto, con la profundidad de la capa superficial creada con tensiones compresión.
Se ha deducido una ecuación empírica que conecta las principales variables que afectan el tamaño de la huella:

$$d = 1.278.D.P^{0.25}.\rho^{0.25}.v^{0.5}/ B^{0.25} \quad (10)$$

Dónde d= diámetro de la huella, D= diámetro de la granalla, P= proporción de energía cinética perdida en el impacto, ρ = densidad de la granalla, v= velocidad de la granalla y B = dureza Brinell del componente.
En palabras, la ecuación (10) implica que el diámetro de la huella es directamente proporcional al diámetro de la granalla, proporcional a la raíz cuadrada de la velocidad de la granalla, pero solo proporcional a la cuarta raíz de la proporción de energía cinética absorbida en el impacto y la densidad de la granalla. El diámetro de la huella se reduce con la cuarta potencia de la dureza Brinell del componente. Por lo tanto, por ejemplo, duplicar el diámetro de la huella requiere un aumento de cuatro veces la velocidad de la granalla y un aumento de ocho veces en la densidad de la granalla.

COBERTURA

(1) Cobertura versus Tiempo de tratamiento

La ecuación para la cobertura versus el tiempo de tratamiento es:

$$\mathbf{C = 100(1 - \exp((-\pi D^2/4).\ R.t))} \quad (11)$$

Donde **C** es el porcentaje de cobertura, **D** es el diámetro promedio de cada huella, **R** es la tasa de impacto (número de huellas por unidad de área de superficie por unidad de tiempo de tratamiento) y **t** es el tiempo de tratamiento.

(2) Tasa de cobertura

La tasa de cobertura es muy importante para los aplicadores de shot peening, porque determina cuánto tiempo debe tratarse un componente para alcanzar la cobertura especificada por el cliente.
La tasa de cobertura, K, viene dada por:

$$\mathbf{K =(\pi\ D^2/4).\ R} \quad (12)$$

Para lo cual el término $\mathbf{\pi D^2/4}$ es el área proyectada de cada huella. Si podemos asignar un valor a **K**, podemos predecir la cobertura que se logrará en un tiempo de tratamiento dado, **t**. La ecuación **(11)** se simplifica a:

$$\mathbf{C = 100(1 - \exp(-K.t))} \quad (13)$$

La tasa de cobertura, **K**, es simplemente el producto del área promedio de las huellas multiplicada por la tasa a la que se producen estas huellas.

IMPACTOS MÚLTIPLES

A medida que aumenta la cobertura, también lo hacen los impactos múltiples en el componente. A muy altos niveles de cobertura existe el peligro de que zonas de la superficie del componente alcancen el límite de su ductilidad, lo que llevará a la formación de grietas. Este tema fue tratado en el artículo anterior de esta serie.

La Fig.7 permite calcular gráficamente el grado de impactos múltiples. Por ejemplo, con una cobertura total del 89%, las áreas doblemente impactadas contribuyen con el 27% al total, las áreas de un solo impacto el 25%, el triple impacto el 20%, el cuádruple impacto del 11%, dejando el 6% con impactos mayores que el cuádruple.

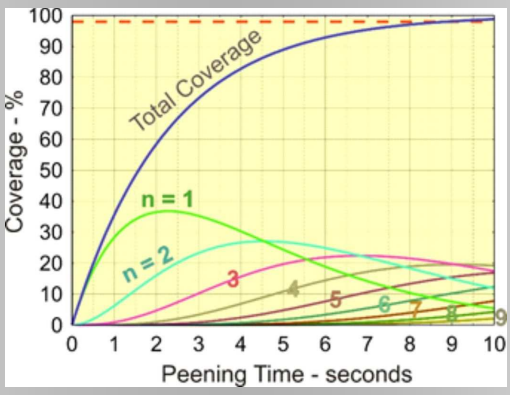

Fig.7. Contribución a la cobertura total de indentaciones simples y múltiples.

INTENSIDAD DE SHOT PEENING

El cálculo de la intensidad es familiar para todos los aplicadores de shot peening. La disponibilidad inmediata de programas basados en ordenador, permite realizar cálculos inequívocos. Sin embargo, hay ciertos principios que deben tenerse en cuenta. Estos se refieren tanto a la recopilación como al análisis de datos. Las ecuaciones de *Solver Suite* utilizadas para las figs. 8 y 9 fueron, respectivamente:

$$h = a*(1 - EXP(-b*t)) \quad (14)$$

$$h = a*(1 - EXP(-b*t^{c})) \quad (15)$$

donde **a**, **b** y **c** son parámetros.

Hay cálculos adicionales cuando se utilizan los programas de la suite Solver. La Fig.10 es un ejemplo ilustrativo. **SUM** indica la calidad del ajuste: valores más pequeños equivalen a un mejor ajuste. La columna **Residuales** muestra cómo los datos se desvían de la ecuación seleccionada y en qué medida.

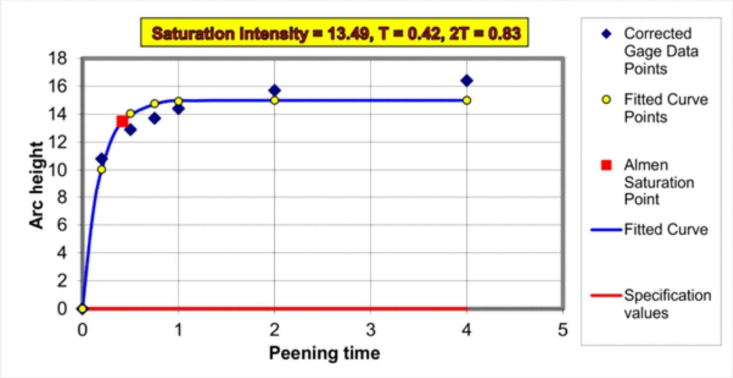

Fig.8. Cálculo de la intensidad utilizando una ecuación de dos variables.

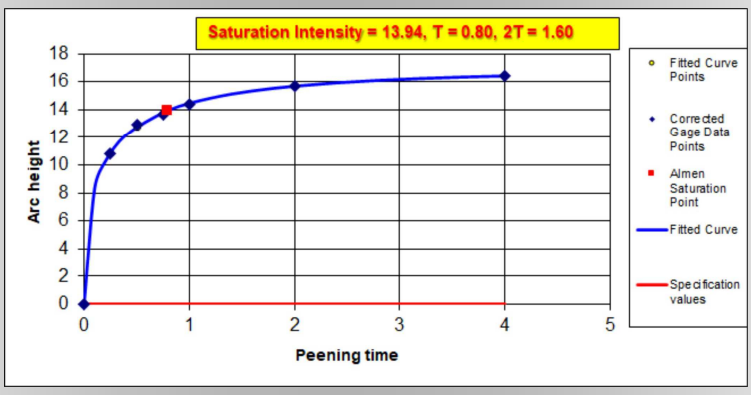

Fig.9. Cálculo de la intensidad de Peening utilizando una ecuación de tres variables.

SATURATION CURVE SOLVER, PROGRAM SCS1
EXP2P STANDARD vers.09

Strip No.	Time	Arc Height	Pre-bow	Corrected Height	Calc. Y	Residuals	Res. Sqrd.	Parameters	Values
								a	8.65
	0	0	0	0	0	0	0	b	0.53
1	1	4	0.2	3.8	3.53419	-0.265813	0.070657	Start value for a=	9
2	2	6.3	0.5	5.8	5.62433	-0.175672	0.030861		
3	4	7.5	0.2	7.3	7.5915	0.2915015	0.084973	Sat. Intensity =	7.35
4	6	8	0.1	7.9	8.27954	0.3795433	0.144053	T =	3.61
5	8	8.3	0.1	8.2	8.52019	0.320194	0.102524		
6	13	8.8	0.3	8.5	8.64027	0.1402742	0.019677		
7	18	8.9	0.1	8.8	8.64896	-0.151038	0.022813		
8	22	9.2	0.2	9	8.64956	-0.350444	0.122811	If WARNING or ERROR appear	
9	26	9.4	0.4	9	8.64963	-0.350371	0.12276	above, read note below graph.	
						SUM =	0.72113	RMS-R=	0.2831
			Lower Spec.=						
			Upper Spec.=						

STEP 1 Enter data values within blue frame after deleting previous values.
Arc heights to be in thousandths of an inch or micrometers.
STEP 2 Enter largest CORRECTED arc height as a start value for "a" in J4 (required value appears in J6).
STEP 3 Select box containing Sum of Residuals squared, H16, click Data (on Excel toolbar), select SOLVER, click on SOLVE, press OK.
STEP 4 Enter required Lower and Upper specification values in red frame above - if you wish to, otherwise delete previous values.

Fig.10. Ejemplo de cálculos de un programa Solver. Se puede utilizar una ecuación de cuatro variables, pero su uso sólo se recomienda con fines de investigación.

DISCUSIÓN

Se ha intentado cubrir los principales tipos de cálculo con los que ahora se encuentran los usuarios. El enfoque ha sido basar los cálculos en una combinación de datos y la selección de una ecuación apropiada. Normalmente, podemos predecir el tipo de ecuación que será apropiada. Habiendo ajustado la ecuación a los datos, podemos examinar su importancia. Si la ecuación no se ajusta bien a los datos, tenemos que considerar por qué y considerar ecuaciones alternativas.

Es recomendable almacenar cálculos anteriores con fines de comparación. Por ejemplo, podremos encontrarnos con que hay una tendencia general hacia abajo en la intensidad calculada, incluso si se han aplicado exactamente los mismos parámetros de shot peening. Esto podrá estar relacionado con diferentes causas, como, por ejemplo, la reducción del tamaño de la granalla en la mezcla operativa.

Finalmente, vale la pena repetir la frase inicial: "La capacidad de cuantificar sus variables ha permitido que el shot peening evolucione hacia un proceso tecnológico inteligente".

IPAR-BLAST, S.L.
Parque Industrial Itziar-Deba
Parcela 4 - Pabellón F2-5
20829 ITZIAR (Guipúzcoa)
TEL. 943 820 516
FAX. 943 820 619
shot-peening@ipar-blast.com

ELECTRONICS INC.
56790 Magnetic Drive
46545 MISHAWAKA (Indiana)
EE.UU.
TEL: 574-256-5001 / 800-832-5653
FAX: 574-256-5222
www.electronics-inc.com