

Libro Blanco Técnico sobre el Proceso de Curvado de Tubos de Escape Integrados sin Soldadura

— Solución de Conformado de Tubos Integrada para Tubos de Escape de Pared Delgada de Acero Inoxidable/Aleación de Titanio para Motocicletas y Automóviles

Autor / Organización: SANCO GROUP

Sitio Web Oficial: www.sancomachine.com

Versión: V1.0

Fecha de Lanzamiento: Julio de 2026

Categoría del Documento: Libro Blanco Técnico / Documento de Solución de Procesos

Organización: SANCO GROUP (www.sancomachine.com)

Palabras clave: Curvado de tubos integrado; Tubo de escape sin soldadura; Acero inoxidable de pared delgada; Aleación de titanio; Radio de curvado pequeño; Matriz de carburo de tungsteno C12; Mandril; Matriz alisadora; Matriz de sujeción; Curvado por tracción rotatoria

Resumen

Los productos de tubos de escape para motocicletas y automóviles presentan cuatro características típicas del proceso: radio de curvado pequeño ($R/D \leq 1.5$), espesor de pared delgado ($t/D \leq 0.05$), materiales de alto rendimiento (acero inoxidable 304/316L, aleación de titanio Gr.2/Gr.9) y secciones rectas extremadamente cortas entre dos curvas (incluso cercanas a cero). La solución tradicional adopta el método de producción de "codo prefabricado + empalme por soldadura". Aunque el proceso es sencillo, existen defectos inherentes como la corrosión en la zona afectada térmicamente (ZAT) de la soldadura, turbulencia en el flujo de aire, reducción de la vida a la fatiga, consistencia estética deficiente y elevados costes de postprocesado.

Este libro blanco, basado en años de práctica de ingeniería por el fabricante de curvadoras de tubos SANCO GROUP (www.sancomachine.com), describe sistemáticamente una solución de conformado por curvado por tracción rotatoria (RDB) integrada y sin soldadura para tubos de escape. La solución logra un conformado sin defectos de materiales de pared delgada y difíciles de deformar bajo condiciones extremas de $1D \leq R \leq 1.5D$, $t/D \leq 0.05$ y sección recta $L \leq 0.5D$ mediante la aplicación

colaborativa de cinco tecnologías de proceso clave: matriz de curvado de carburo de tungsteno C12, mandril flexible multibola, matriz alisadora de cobre, matriz de sujeción dentada antideslizante y matriz de sujeción conformada de doble capa. El documento proporciona valores recomendados para los parámetros principales del proceso, criterios de selección de materiales de las matrices, flujo de proceso y soluciones de control de calidad, ofreciendo una ruta técnica replicable para que las empresas de fabricación de tubos de escape logren actualizaciones de "integración, ligereza y ausencia de soldaduras".

Índice de Contenidos

1. Introducción

2. Análisis de Dificultades en el Proceso de Curvado de Tubos de Escape

3. Solución Técnica General para el Curvado Integrado de Tubos sin Soldadura

4. Explicación Detallada de Tecnologías de Proceso Clave

- 4.1 Matriz de Curvado de Carburo de Tungsteno C12: Selección de Matrices para Materiales de Alta Resistencia
- 4.2 Mandril Flexible Multibola: Prevención del Colapso de Pared Delgada y Distorsión de la Sección Transversal
- 4.3 Matriz Alisadora de Cobre: Inhibición de Defectos de Arrugado en Radios de Curvado Pequeños
- 4.4 Matriz de Sujeción Dentada Antideslizante y Matriz de Sujeción Conformada de Doble Capa: Resolución de Desafíos de Sujeción en Secciones Rectas Cortas

5. Recomendación de Parámetros de Proceso y Tabla de Referencia de Selección

6. Flujo del Proceso de Conformado Integrado y Control de Calidad

7. Significado Económico e Industrialización

8. Conclusión y Perspectivas

Apéndice A: Demostración en Vídeo de Ingeniería (con marcador de posición para código QR)

Apéndice B: Símbolos y Glosario

Referencias

1. Introducción

1.1 Contexto de la Industria

Impulsados por la estrategia global de "Doble Carbono" y la tendencia hacia la ligereza en motocicletas y automóviles, los sistemas de escape de alto rendimiento, como uno de los componentes clave del tren motriz, están evolucionando rápidamente hacia paredes delgadas, ligereza, alta resistencia a la corrosión y una apariencia de alta calidad. Tomando como ejemplo un tubo de escape central-trasero típico de una motocicleta de gama alta, su diámetro exterior suele ser de $\phi 38 \sim \phi 60$ mm, el espesor de pared ha disminuido de 1.5 mm a $0.8 \sim 1.0$ mm, y el material se ha actualizado de acero al carbono ordinario a acero inoxidable 304, 316L, o incluso titanio puro Gr.2 o aleación de titanio Gr.9; mientras tanto, para lograr el flujo de escape óptimo dentro del espacio limitado del chasis, las piezas de tubería generalmente tienen múltiples curvas de radio pequeño cercanas entre sí, casi sin transición recta entre curvas.

1.2 Defectos Inherentes del Proceso de Soldadura Tradicional

Ante estas severas restricciones geométricas y de materiales, la industria adopta comúnmente una solución de fabricación segmentada de "codo prefabricado + sección de tubo recto + empalme por soldadura manual/automática". Esta solución presenta los siguientes defectos técnicos y económicos no despreciables:

N.º	Categoría de defecto	Manifestación	Consecuencia
1	Defecto metalúrgico	Engrosamiento de granos y sensibilización en la zona afectada por el calor de la soldadura (ZAC)	Resistencia a la corrosión intergranular reducida entre un 30 y un 50%
2	Concentración de tensiones	Poros y fusión incompleta fácilmente generados en la raíz de la soldadura	Vida útil a la fatiga reducida en más de un 40%
3	Campo de flujo turbulento	Protuberancias internas y desalineación en la costura de soldadura	Aumento de la contrapresión de escape y pérdida de potencia del motor
4	Poca uniformidad estética	Diferencias de color y anillos de oxidación en las soldaduras	Se requiere pulido secundario / acabado electrolítico para vehículos de gama alta
5	Coste integral elevado	Múltiples procesos: soldadura, conformado, lijado, prueba de estanqueidad	Coste unitario incrementado entre un 20 y un 35%

N.º	Categoría de defecto	Manifestación	Consecuencia
6	Dificultad de soldadura de aleación de titanio	El titanio absorbe oxígeno e hidrógeno a altas temperaturas, provocando fragilización	La soldadura debe realizarse en cámara protegida con gas inerte con una eficiencia muy baja

1.3 Proposición Principal de esta Solución

¿Se puede utilizar una sola curvadora de tubos, un solo tubo y una sola sujeción para curvar toda la sección del tubo de escape, eliminando completamente las soldaduras?

La respuesta es sí. Este libro blanco demostrará sistemáticamente que: siempre que se realicen diseños específicos en las cuatro dimensiones clave de selección de materiales de matrices, diseño de mandriles, inhibición de arrugas y método de sujeción, se puede lograr de forma estable el conformado integrado de materiales de pared delgada y difíciles de deformar con radios pequeños, secciones rectas cortas y curvas múltiples.

La Figura 1 presenta intuitivamente la comparación de apariencia entre los tubos de escape soldados tradicionales y los tubos de escape de conformado integrado.



Figura 1 Comparación de Apariencia entre el Tubo de Escape Soldado Tradicional (Izquierda) y el Tubo de Escape Integrado sin Soldadura (Derecha) — © SANCO GROUP · www.sancomachine.com

📺 Vídeo 1: Demostración de Comparación de Rendimiento entre Tubo de Escape Soldado y Tubo de Escape de Conformado Integrado

(Marcador de posición para vídeo y código QR reservado aquí. Contenido de vídeo recomendado:

sección transversal de soldadura de dos tubos de escape + comparación de datos del banco de pruebas de contrapresión).

[Marcador de posición de código QR — 60 × 60 mm]

2. Análisis de Dificultades en el Proceso de Curvado de Tubos de Escape

Antes de introducir la solución en profundidad, es necesario aclarar las cuatro dificultades del curvado de tubos de escape a nivel mecánico, que son el punto de partida para todos los diseños de procesos en este libro blanco.

2.1 Concentración de Deformación Causada por el Radio de Curvado Pequeño

Durante el proceso de curvado, la pared exterior del tubo soporta esfuerzos de tracción, la pared interior soporta esfuerzos de compresión, y el esfuerzo es mínimo cerca de la capa neutra. La deformación máxima por tracción de la pared exterior puede expresarse aproximadamente como:

Donde R es el radio de la línea central de curvado y D es el diámetro exterior del tubo. Cuando $R/D = 1$ (es decir, curvado 1D), $\epsilon = 50\%$, lo que ha superado con creces el margen de seguridad del alargamiento uniforme de aproximadamente el 45% para el acero inoxidable 304, provocando fácilmente el adelgazamiento y agrietamiento de la pared exterior; al mismo tiempo, la deformación por compresión de la pared interior causa inestabilidad del material y arrugado. Por cada reducción de 1D en el radio de curvado, la dificultad de conformado aumenta de forma no lineal.

2.2 Colapso de la Sección Transversal Causado por Paredes Delgadas

La capacidad de un tubo para resistir la deformación de la sección transversal es proporcional al cubo del espesor de la pared. Cuando $t/D \leq 0.05$ (por ejemplo, tubo de $\phi 50 \times 1.0$ mm), la pared interior de la zona de curvado tiende a colapsar hacia la cavidad del tubo bajo presión, formando defectos de "lomo de gato" u ovalización; mientras tanto, el adelgazamiento de la pared exterior hace que la sección transversal muestre una distorsión típica en forma de pera, afectando directamente al área de flujo de escape y a la calidad estética.

2.3 Alta Resistencia a la Deformación Causada por los Materiales

El acero inoxidable 304 tiene un límite elástico ≥ 205 MPa y una resistencia a la tracción ≥ 520 MPa; la aleación de titanio Gr.9 (3Al-2.5V) tiene un límite elástico ≥ 620 MPa y un endurecimiento por deformación significativo, lo que requiere una dureza de matriz y un acabado superficial extremadamente altos. Además, las aleaciones de titanio tienen una seria tendencia a adherirse a la

matriz, formando fácilmente soldadura en frío en la ranura de la matriz, lo que provoca el rayado superficial de la pieza del tubo.

2.4 Longitud de Sujeción Insuficiente Causada por Secciones Rectas Cortas

Teóricamente, la longitud de sujeción efectiva de la matriz de sujeción para el curvado por tracción rotatoria debería ser $\geq 2 \sim 3$ veces el diámetro del tubo para asegurar que no haya deslizamiento bajo el momento flector máximo. Sin embargo, la sección recta L entre dos curvas del tubo de escape suele ser inferior a 1D, y en algunos diseños incluso tienen $L \approx 0$. En este caso, independientemente de cómo se diseñe la matriz de sujeción de ranura plana ordinaria, no puede proporcionar suficiente área de sujeción, y el deslizamiento tangencial ocurrirá inevitablemente durante el proceso de curvado, lo que lleva a la pérdida de control del ángulo de curvado y al agrietamiento por tracción de la pared exterior.

3. Solución Técnica General para el Curvado Integrado de Tubos sin Soldadura

En respuesta a las cuatro dificultades mencionadas, esta solución (propuesta por SANCO GROUP) construye un sistema técnico sistemático de "una máquina, dos matrices y tres controles":

- Una máquina:** Curvadora por tracción rotatoria (RDB) CNC de alta rigidez, par del husillo $\geq 8000 \text{ N}\cdot\text{m}$, precisión de posicionamiento repetido $\pm 0.05^\circ$;
- Dos matrices:** Matriz de curvado de carburo de tungsteno C12 como actuador activo, y matriz alisadora de cobre como inhibidor pasivo;
- Three controls:** Shape control — Mandril flexible multibola para el control geométrico de la sección transversal;
- Control de estabilidad — Matriz alisadora + dispositivo de refuerzo para la inhibición de la inestabilidad;
- Control de sujeción — Matriz de sujeción dentada antideslizante / conformada de doble capa para la sujeción estable de secciones rectas extremadamente cortas.

La relación colaborativa entre las cinco tecnologías clave se puede resumir en la siguiente tabla:

Dificultad del proceso	Tecnología principal de resolución	Tecnología auxiliar
Radio de curvatura pequeño → formación de arrugas	Matriz antiarrugas de cobre	Ajuste preciso del voladizo del mandril
Pared delgada → colapso de la sección transversal	Mandriles flexibles multiesféricos	Fuerza de empuje trasero
Material de alta resistencia → desgaste y soldadura en frío de la matriz	Matriz de curvatura de carburo cementado C12	Recubrimiento superficial TiN / DLC
Segmento recto muy corto → deslizamiento al sujetar	Matriz de sujeción con estrías antideslizantes + matriz de sujeción conformal de doble cavidad	Aumentar la presión de sujeción

Los principios de funcionamiento, puntos de diseño y precauciones de implementación de las cinco tecnologías clave se describen en detalle en los capítulos siguientes.

4. Explicación Detallada de Tecnologías de Proceso Clave

4.1 Matriz de Curvado de Carburo de Tungsteno C12: Selección de Matrices para Materiales de Alta Resistencia

4.1.1 Lógica de Selección de Materiales

La matriz de curvado es el actuador central con el esfuerzo más complejo y el desgaste más serio de todas las matrices de la curvadora de tubos. Su ranura interna necesita deslizarse relativamente con la pieza del tubo bajo un enorme esfuerzo de contacto. Si la dureza de la matriz es insuficiente, aparecerán rápidamente modos de fallo como el colapso de la ranura, el desprendimiento de bordes y el desgaste superficial. Una comparación de los materiales comunes para las matrices de curvado y sus características es la siguiente:

Material	Dureza Rockwell (HRC)	Tenacidad al impacto	Resistencia al desgaste	Coste de mecanizado	Escenario de aplicación
Acero al carbono medio 45#	25 ~ 30	★★★★★	★	Bajo	Pruebas de prototipos, tubos de cobre/aluminio blando
42CrMo	38 ~ 42	★★★★★	★★	Medio	Tubos de acero al carbono

Material	Dureza Rockwell (HRC)	Tenacidad al impacto	Resistencia al desgaste	Coste de mecanizado	Escenario de aplicación
					convencional
Acero herramienta Cr12MoV	55 ~ 60	★★★	★★★★	Medio-Alto	Producción en serie de piezas de acero inoxidable
C12 (carburo cementado WC-Co)	≥ 88 (HRA) / equivalente aprox. 72 HRC	★★	★★★★★	Alto	Tubos de pared delgada de acero inoxidable y aleación de titanio

El C12 es un grado típico de carburo de tungsteno-cobalto de cobalto medio (contenido de Co 6 ~ 10%) (perteneciente al sistema de carburo para herramientas generales de clase K). Su macrodureza alcanza por encima de HRA 88 (superando con creces el HRC 60 del acero aleado para herramientas), y su resistencia al desgaste es unas 5 ~ 8 veces mayor que la del Cr12MoV; mientras tanto, su resistencia a la flexión puede alcanzar los 2500 ~ 3000 MPa, suficiente para soportar presiones de contacto de varias decenas de kN durante el proceso de curvado de tubos de acero inoxidable de pared delgada.

4.1.2 Puntos de Diseño Estructural

Ajuste del radio de la ranura: Radio de la ranura = $0.5D + 0.02 \sim 0.05$ mm (compensación de tolerancia negativa), para evitar el "levantamiento" del tubo;

Rugosidad de la superficie de la ranura: $Ra \leq 0.4 \mu\text{m}$, pulido espejo; para aleaciones de titanio, se debe aplicar adicionalmente un recubrimiento de TiN / DLC para reducir el coeficiente de fricción por debajo de 0.1; la matriz de sujeción, la matriz alisadora y la matriz de presión se actualizan simultáneamente; dado que la dureza de la matriz de curvado C12 es mucho mayor que la de las matrices complementarias, si estas siguen siendo de acero ordinario, serán desgastadas por el C12 de forma inversa, por lo que se recomienda configurar carburo para las piezas clave en conjuntos;

Proceso de tratamiento térmico e incrustación: El material C12 es frágil, por lo que suele utilizarse una estructura compuesta de base de acero + incrustación de carburo para equilibrar la dureza y la resistencia al impacto; las incrustaciones se fijan mediante soldadura

fuerte a alta temperatura o pernos de precisión para facilitar su sustitución local.

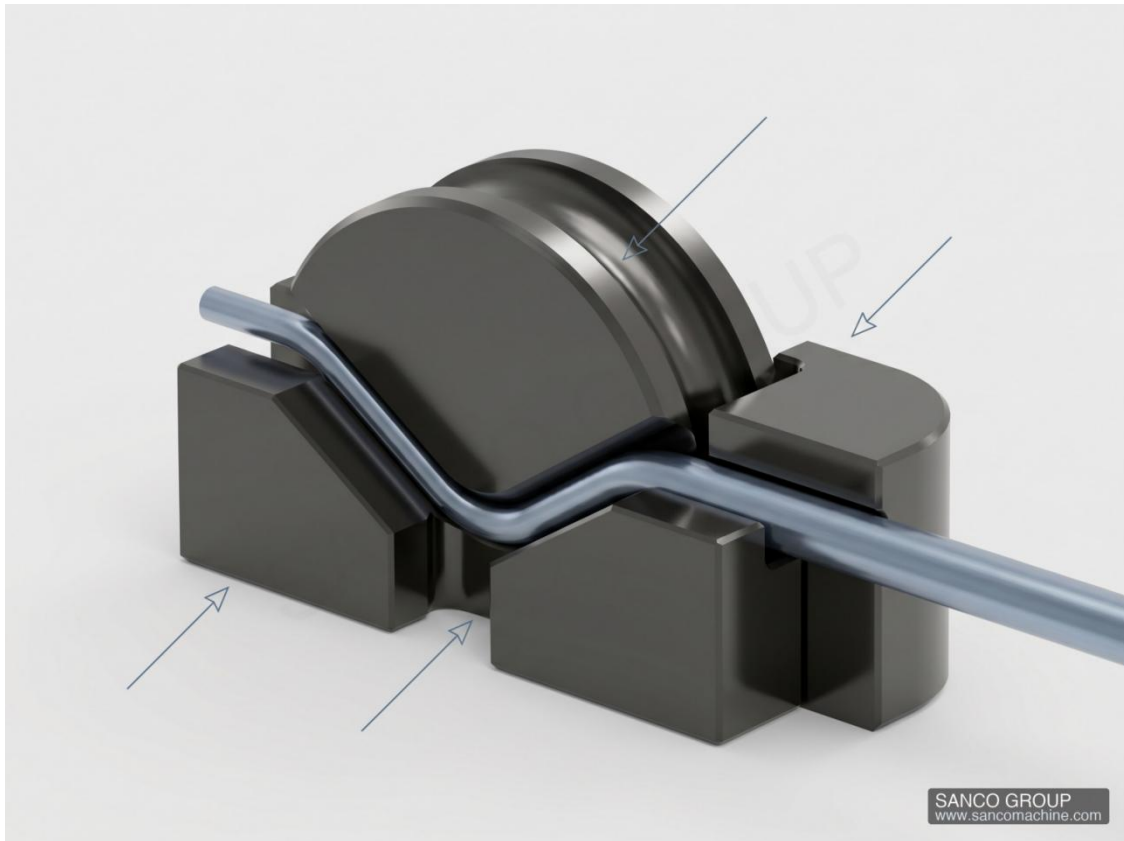


Figura 2 Renderizado de la Sección Transversal de la Matriz de Curvado de Carburo de Tungsteno C12 (Incluyendo el Juego de Matriz de Curvado, Matriz de Sujeción y Matriz de Presión) —

© SANCO GROUP · www.sancomachine.com

📺 Vídeo 2: Demostración de Montaje y Puesta en Marcha de la Matriz de Carburo de Tungsteno C12

(Marcador de posición para vídeo y código QR reservado aquí. Contenido de vídeo recomendado: el proceso completo desde el desembalaje, instalación, centrado hasta el curvado de prueba de la matriz).

[Marcador de posición de código QR — 60 × 60 mm]

4.2 Mandril Flexible Multibola: Prevención del Colapso de Pared Delgada y Distorsión de la Sección Transversal

4.2.1 Papel Mecánico del Mandril

El mandril es el elemento de soporte interno central para controlar la forma de la sección transversal de los tubos de pared delgada. Su esencia es proporcionar una superficie de soporte rígida cercana al diámetro interior del tubo dentro de la cavidad de la zona de curvado, resistiendo la fuerza de colapso hacia adentro de la pared interior y limitando la tendencia de ovalización de la pared exterior.

4.2.2 Selección del Tipo de Mandril

Tipo de mandril	Descripción estructural	Capacidad de soporte	R/D aplicable	Observaciones
Tipo tapón macizo	Cilindro de cabeza única	Baja	$\geq 3D$	Solo para tubos de pared gruesa
Tipo esfera simple	Una única esfera	Media	$2D \sim 3D$	Tubos de pared de grosor medio
Tipo multiesférico (3 ~ 5 esferas)	Varias esferas conectadas en serie con articulaciones	Alta	$1D \sim 1,5D$	Opción preferente para tubos de escape de pared delgada
Tipo cable flexible	Cadena de cable de acero integrada	Muy alta	$0,8D \sim 1D$	Para condiciones de trabajo extremas

Para las condiciones típicas de radio pequeño $1D \sim 1.5D$ + pared delgada de los tubos de escape, se recomienda un mandril flexible de 3 ~ 5 bolas. La fórmula empírica para calcular el número de bolas es: Donde θ es el ángulo de curvado (en radianes), R es el radio de curvado y P es el paso entre bolas (generalmente $1.0 \sim 1.2 D$).

4.2.3 Parámetros Clave del Mandril

Tolerancia del diámetro de la bola: $D_{\text{bola}} = D_{\text{interior}} - (0.15 \sim 0.25) \text{ mm}$, es decir, el huelgo del mandril se controla en $0.15 \sim 0.25 \text{ mm}$; un huelgo excesivo $\rightarrow$ colapso fuera de control, huelgo demasiado pequeño $\rightarrow$ rayado/atascamiento;

Paso (Avance): La distancia de avance de la cabeza del mandril respecto al punto de tangencia, normalmente $e = (1/3 \sim 2/3) \cdot D$; un avance excesivo provoca un adelgazamiento excesivo de la pared exterior, y un avance demasiado pequeño provoca el arrugado de la pared interior;

Material del mandril: Se recomienda que el cuerpo sea de SKD11 o H13 templado a HRC 58 ~ 62, con recubrimiento de TiN / CrN / DLC, coeficiente de fricción ≤ 0.15 ;

Método de lubricación: El curvado de aleación de titanio debe utilizar aceite de curvado de extrema presión a alta presión, suministrado continuamente a la zona de curvado a través del orificio

interior de la varilla del mandril.

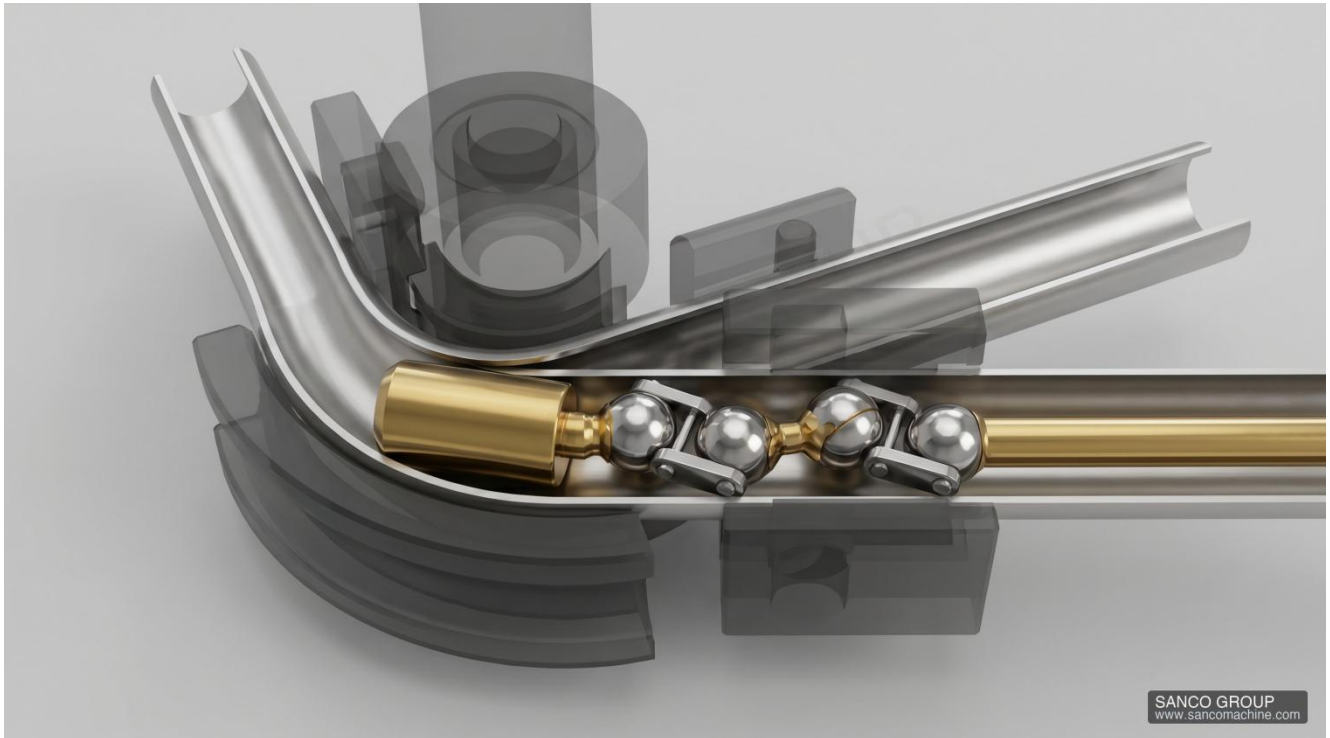


Figura 3 Diagrama Esquemático del Mandril Multibola (Multi-ball Mandrel) Trabajando Dentro de un Tubo de Pared Delgada (La Sección del Cuerpo del Tubo Muestra la Estructura Interna) — —

© SANCO GROUP · www.sancomachine.com

📺 Vídeo 3: Proceso de Trabajo Real del Mandril Multibola en un Tubo de Acero Inoxidable de Pared Delgada

(Marcador de posición para vídeo y código QR reservado aquí. Contenido de vídeo recomendado: prueba de matriz transparente o toma real con endoscopio industrial).

[Marcador de posición de código QR — 60 × 60 mm]

4.3 Matriz Alisadora de Cobre: Inhibición de Defectos de Arrugado en Radios de Curvado Pequeños

4.3.1 Mecanismo de Arrugado

En el curvado de R/D pequeño, el material del lado interior de la zona de curvado se somete a un esfuerzo de compresión tangencial. Una vez que el esfuerzo de compresión supera su valor crítico de inestabilidad, aparecen arrugas longitudinales en forma de onda. Teóricamente, la condición crítica para la inestabilidad y el arrugado de los tubos es aproximadamente:

Donde K es el coeficiente de restricción (generalmente 0.6 ~ 1.2) y E es el módulo elástico. Cuando t/D es extremadamente pequeño y R/D es extremadamente pequeño, σ_{cr} cae bruscamente, y el arrugado es casi inevitable.

4.3.2 Principio de Funcionamiento de la Matriz Alisadora

La matriz alisadora es una herramienta en forma de cuña instalada detrás del punto de tangencia de curvado y ajustada al lado interior de la curva del tubo. Su función es presionar y "raspar" las arrugas en el momento en que comienzan a brotar, evitando así que las arrugas continúen desarrollándose y acumulándose en la zona de curvado.

4.3.3 ¿Por qué elegir Cobre (Bronce / Cobre al Berilio)?

Material	Dureza (HB)	Coeficiente de fricción	Riesgo de rayar titanio/acero inoxidable	Conclusión
Acero templado	350 ~ 450	0,25 ~ 0,35	Riesgo alto	✗ No recomendado
Bronce de aluminio QAI9-4	170 ~ 200	0,10 ~ 0,15	Riesgo bajo	✓ Recomendado
Bronce de berilio QBe2	≈ 380	0,08 ~ 0,12	Riesgo bajo	✓ Muy recomendado (para aleaciones de titanio)
Recubrimiento compuesto MoS ₂ / grafito	—	0,05 ~ 0,08	Ninguno	✓ Recubrimiento superficial auxiliar

La ventaja clave de las aleaciones de cobre sobre el acero templado es que no dejan marcas de rayado en la superficie del acero inoxidable y de las aleaciones de titanio, mientras que sus propiedades de autolubricación reducen significativamente la tendencia a la adhesión entre metales. El bronce al berilio (QBe2) es particularmente destacado en dureza y resistencia al desgaste, y es el material preferido para la matriz alisadora al curvar tubos de escape de aleación de titanio.

4.3.4 Instalación y Ajuste de la Matriz Alisadora

Alineación del punto de tangencia: La punta de la matriz alisadora debe estar alineada con precisión con el punto de tangencia del curvado, desviación ≤ 0.1 mm;

Longitud de contacto: Generalmente 2 ~ 3D;

Huelgo de ajuste: Huelgo con la pared del tubo de 0.02 ~ 0.05 mm, "ajuste holgado pero claro";

Ángulo de Inclinación: 0° ~ 3°, ligeramente inclinado hacia el lado interior del tubo;

Para aleaciones de titanio: Se recomienda volver a afilar la punta cada 500 ~ 1000 curvados para asegurar la nitidez.



Figura 4 Diagrama Esquemático de la Posición de la Matriz Alisadora de Cobre en el Dispositivo de Curvado por Tracción Rotatoria — © SANCO GROUP · www.sancomachine.com

📺 Vídeo 4: Enseñanza de Ajuste en el Sitio de la Matriz Alisadora

(Marcador de posición para vídeo y código QR reservado aquí. Contenido de vídeo recomendado: técnico ajustando el huelgo de la matriz alisadora con una galga de espesores + comparación de los efectos de curvado de prueba).

[Marcador de posición de código QR — 60 × 60 mm]

4.4 Matriz de Sujeción Dentada Antideslizante y Matriz de Sujeción Conformada de Doble Capa: Resolución de Desafíos de Sujeción en Secciones Rectas Cortas

4.4.1 Desafíos Físicos de la Sujeción de Secciones Rectas Cortas

Durante el proceso de curvado, la matriz de sujeción debe soportar la tensión tangencial de curvado F_t y la fuerza de cizallamiento resultante. Cuando la longitud de sujeción efectiva es insuficiente, la fricción entre la matriz de sujeción y el tubo no es suficiente para resistir la tensión tangencial, y el tubo es "sacado", lo que provoca:

- Ángulo de curvado insuficiente;
- Adelgazamiento excesivo de la pared exterior e incluso agrietamiento;
- La curvatura del curvado anterior es "tirada hacia atrás" y se distorsiona.

Cuando el área de sujeción no puede aumentarse (limitada por la geometría de la sección recta del producto), los avances solo pueden realizarse en dos direcciones: ① Aumentar el coeficiente de fricción equivalente μ ; ② Change the clamping geometry so that the "curva ya formada" también participe en la sujeción.

4.4.2 Solución A: Matriz de Sujeción Dentada Antideslizante

Los patrones de dientes microtriangulares o en forma de diamante mecanizados con precisión (altura del diente 0.05 ~ 0.10 mm, paso del diente 0.5 ~ 1.0 mm) en la superficie de la ranura interna de la matriz de sujeción crean una micromordida entre la matriz de sujeción y la pared del tubo, aumentando el coeficiente de fricción equivalente de 0.15 a 0.4 ~ 0.6, y aumentando la fuerza de sujeción entre 3 y 4 veces.

Tipo de estría	Altura de estría	Paso de estría	Escenario de aplicación
Estrías rectas	0,05 mm	0,5 mm	Alta exigencia de acabado superficial
Estrías romboidales	0,08 mm	0,8 mm	Tipo recomendado para uso general
Estrías transversales triangulares	0,10 mm	1,0 mm	Alto par de torsión, se aceptan ligeras hendiduras

⚠ Nota: El patrón de los dientes dejará microimpresiones en la superficie exterior del tubo. Para la sección trasera expuesta del tubo de escape, se recomienda realizar primero el tratamiento antideslizante y luego un pulido secundario; para la sección media ensamblada dentro del vehículo, no afecta en absoluto al uso.

4.4.3 Solución B: Matriz de Sujeción Conformada de Doble Capa — Innovación Central

Cuando la sección recta L entre dos curvas es inferior a 0.5D, o incluso $L \approx 0$ (es decir, el final de la curva anterior es el punto de inicio de la curva actual), cualquier matriz de sujeción de ranura recta no

puede proporcionar suficiente área de sujeción. En este momento, la forma geométrica de la matriz de sujeción debe ser cambiada:

Idea central: Convertir la ranura inferior de la matriz de sujeción en una ranura conformada exactamente consistente con la curva formada anterior, de modo que la "parte ya curvada" quede directamente incrustada en la matriz de sujeción y participe en la sujeción junto con la nueva sección de tubo recto.

De esta manera, la longitud de sujeción equivalente ya no está limitada por la "sección recta restante", sino que se extiende a toda la longitud del arco de la curva anterior, proporcionando de 3 a 5 veces el área de sujeción efectiva. Mientras tanto, la ranura superior conserva la ranura recta estándar para sujetar la parte no curvada.

Parámetro	Valor recomendado	Descripción
Diferencia de plano entre ranuras superior e inferior	$= D + 2 \text{ mm}$	Evita interferencias entre el tramo curvo ya formado y el tramo de tubo nuevo
Radio de ranura conformada	Igual al radio de la curvatura anterior	Debe coincidir 1:1 con el dibujo del producto
Ángulo de envolvimiento de ranura conformada	Igual al ángulo de la curvatura anterior	Suele ser efectivo a partir de 45°
Material	Cr12MoV / C12	Mismo grado que la matriz de sujeción principal
Tipo de estría	Se pueden añadir estrías romboidales antideslizantes	Mejor rendimiento combinado

La mayor importancia de ingeniería de esta solución es: transforma el "conflicto geométrico" en "anclaje geométrico", haciendo que la condición de sección recta corta más difícil tenga en realidad la capacidad de sujeción más fuerte. Esta es la clave que permite que la solución integrada sin soldadura defendida en este libro blanco funcione para productos de tubos de escape extremos.



Figura 5 Diagrama Esquemático de la Matriz de Sujeción Conformada de Doble Capa (Dual-cavity Conformal Clamp Die) Sujetando una Pieza de Tubo de Sección Recta Corta ($L \approx 0$) — —

© SANCO GROUP · www.sancomachine.com

📺 Vídeo 5: Demostración de Curvado Real de la Matriz de Sujeción Conformada de Doble Capa en un Tubo de Escape de Sección Recta Corta

(Marcador de posición para vídeo y código QR reservado aquí. Contenido de vídeo recomendado: una toma completa de todo el proceso desde la carga → el primer curvado → la indexación → el segundo curvado (sin sección recta)).

[Marcador de posición de código QR — 60 × 60 mm]

5. Recomendación de Parámetros de Proceso y Tabla de Referencia de Selección

Basado en el análisis anterior, esta sección proporciona parámetros de proceso recomendados para productos de tubos de escape típicos bajo diferentes condiciones de materiales y geometrías para su consulta directa en la implementación de ingeniería. El siguiente sistema de parámetros ha

sido recopilado por SANCO GROUP (www.sancomachine.com) basado en años de práctica en producción.

5.1 Tabla de Selección Integral de Material × Especificación × R/D

Material	Especificación típica (D × t, mm)	R/D recomendado	Número de esferas del mandril	Material de matriz antiarrugas	Tipo de matriz de sujeción	Aceite de curvado
Acero inoxidable 304	φ38 × 1,0	1,5	3 esferas	Bronce de aluminio QA19-4	Con estrías antideslizantes	Aceite de presión extrema general
Acero inoxidable 304	φ50 × 1,0	1,2	4 esferas	Bronce de aluminio QA19-4	Estrías antideslizantes + conformal de doble cavidad	Aceite de presión extrema general
Acero inoxidable 316L	φ50 × 0,8	1,5	4 esferas	Bronce de aluminio QA19-4	Con estrías antideslizantes	Aceite especial para acero inoxidable
Acero inoxidable 316L	φ60 × 0,8	1,2	5 esferas	Bronce de berilio QBe2	Conformal de doble cavidad	Aceite especial para acero inoxidable
Titanio puro Gr.2	φ50 × 1,0	1,5	4 esferas	Bronce de berilio QBe2	Estrías antideslizantes + conformal de doble cavidad	Aceite de parafina clorada para aleación de titanio
Aleación de titanio Gr.9	φ50 × 0,8	2,0	5 esferas	Bronce de berilio QBe2	Conformal de doble cavidad	Aceite de parafina clorada para aleación de titanio

5.2 Tabla de Referencia Rápida de Parámetros Geométricos Clave

Parámetro	Símbolo	Rango recomendado	Efecto
Radio de curvatura relativo	R/D	1,0 ~ 2,0	Cuanto menor, mayor dificultad de conformado
Espesor relativo de pared	t/D	0,015 ~ 0,05	Valores pequeños dificultan el curvado

Parámetro	Símbolo	Rango recomendado	Efecto
Holgura del mandril	c	0,15 ~ 0,25 mm	Holgura excesiva produce colapso; holgura insuficiente raya el tubo
Voladizo del mandril	e	$(1/3 \sim 2/3) \cdot D$	Regula el grado de adelgazamiento de la pared exterior
Longitud de contacto de la matriz antiarrugas	Lw	$2 \sim 3 \cdot D$	Determina la eficacia de eliminación de arrugas internas
Longitud efectiva de sujeción	Lc	$\geq 2 \cdot D$ (estándar) o $\geq 0,5 \cdot D$ con cavidad conformada	Determina si se produce deslizamiento al sujetar
Relación velocidad empuje / velocidad curvado	$v_{\text{boost}} / v_{\text{bend}}$	0,95 ~ 1,05	Equilibra el adelgazamiento de la pared exterior

5.3 Diagnóstico de Defectos Comunes y Contramedidas

Fenómeno de defecto	Causas posibles	Medidas correctoras
Ruptura de la pared exterior	Voladizo excesivo del mandril / Fuerza de empuje insuficiente	Reducir el voladizo del mandril, aumentar la fuerza de empuje
Arrugas internas de la pared	Holgura excesiva de la matriz antiarrugas / Posición desplazada hacia atrás	Repulir la punta, desplazarla hacia adelante 0,1 ~ 0,2 mm
Colapso de la sección transversal	Pocas esferas del mandril / Holgura excesiva	Añadir esferas, reducir la holgura del mandril
Rayas superficiales del tubo	Poca lubricación / Superficie rugosa de la matriz	Cambiar a aceite de presión extrema, pulido espejo de las matrices
Deslizamiento en la sujeción	Poca longitud de sujeción / Baja fricción	Utilizar matriz con estrías antideslizantes o matriz conformal de doble cavidad
Ángulo de curvatura insuficiente	Poca compensación de retroceso elástico	Añadir sobrecurvatura de $2 \sim 5^\circ$
Descoloración superficial de aleación de titanio	Temperatura excesiva / Rotura de la película lubricante	Reducir velocidad de curvado, aumentar refrigeración y lubricación

6. Flujo del Proceso de Conformado Integrado y Control de Calidad

6.1 Flujo Completo del Proceso

El proceso de fabricación completo de los tubos de escape integrados sin soldadura es el siguiente:

- ① Corte (corte por láser a longitud fija ± 0.5 mm)
↓
- ② Achaflanado de extremos y desbarbado
↓
- ③ Limpieza y desengrasado de paredes interiores y exteriores
↓
- ④ Aplicación de aceite de curvado (recubrimiento por inmersión para aleación de titanio)
↓
- ⑤ Carga en la curvadora de tubos CNC RDB, alineada con el primer dato de posicionamiento
↓
- ⑥ Ejecución secuencial de N pasos de curvado (cada paso: sujeción → curvado → aflojamiento → alimentación e indexación)
↓
- ⑦ Corte, conformado de extremos
↓
- ⑧ Inspección de calidad (CMM + endoscopia)
↓
- ⑨ Tratamiento superficial (pasivado / electropulido / anodizado)
↓
- ⑩ Almacenamiento

6.2 Tres Acciones Sincronizadas Clave de la Curvadora de Tubos

Dentro de un solo paso de curvado, la máquina debe lograr una sincronización estricta de tres acciones principales:

Acción	Componente ejecutor	Variables de control clave
Curvado	Husillo + Matriz de curvado	Ángulo, velocidad, par de torsión
Empuje	Carro de empuje	Fuerza de empuje, velocidad de empuje
Sujeción	Matriz de sujeción	Presión de sujeción, temporización de apertura y cierre

La falta de sincronización entre las tres causará directamente: agrietamiento de la pared exterior (refuerzo insuficiente), arrugado de la pared interior (refuerzo excesivo) o rayado superficial (sincronización de sujeción incorrecta). Se recomienda utilizar modelos CNC RDB con bucle cerrado de par y refuerzo controlado por fuerza.

6.3 Métricas de Control de Calidad (QC Metrics)

Indicador	Método de inspección	Criterio de aceptación
Tasa de adelgazamiento de pared exterior	Grosómetro ultrasónico / Corte transversal	$\leq 20\%$
Altura de arrugas internas	Endoscopio + medición óptica	$\leq 0,05 \cdot t$
Ovalidad de la sección transversal	Máquina de medición por coordenadas (MMC)	$\leq 5\%$
Precisión del ángulo de curvado	Máquina de medición por coordenadas (MMC)	$\pm 0,3^\circ$
Dimensión de longitud total	Máquina de medición por coordenadas (MMC)	$\pm 0,5 \text{ mm}$
Rugosidad superficial	Rugosímetro	$Ra \leq 1,6 \mu\text{m}$
Rayaduras superficiales	Inspección visual + lente 10x	Sin rayaduras visibles a simple vista

7. Significado Económico e Industrialización

7.1 Comparación de Costes Unitarios (Tomando como ejemplo un tubo de escape central típico de una motocicleta)

Rubro de coste	Proceso de soldadura	Proceso integrado monobloque	Variación
Materia prima	100% (referencia)	105% (+5%)	+5%
Tiempo de curvado / soldadura	45 min	8 min	-82%
Consumibles de soldadura (gas inerte)	Necesarios	Sin consumo	-100%
Conformado / lijado	20 min	3 min	-85%
Prueba de estanqueidad	Obligatoria	Suprimida	-100%
Tasa de piezas defectuosas	5 ~ 8%	1 ~ 2%	-70%
Coste unitario integral total	100%	65 ~ 75%	-25 ~ 35%

7.2 Ganancias en Rendimiento y Apariencia

Reducción de la contrapresión: la protuberancia de la pared interna de la soldadura desaparece, y la pérdida de flujo de gas disminuye entre un 3 y un 8%;

Vida a la fatiga: sin zona afectada térmicamente, los ciclos de fatiga medidos en el banco de pruebas mejoraron entre un 40 y un 60%;

Vida de resistencia a la corrosión: elimina la zona de sensibilización, la vida en el ensayo de niebla salina mejoró de 2 a 3 veces;

Calidad de apariencia: consistencia de espejo en todo el tubo, coincidiendo directamente con los requisitos estéticos de los modelos de gama alta;

Ligereza: se pueden utilizar materiales de pared más delgada, reduciendo el peso de todo el tubo entre un 8 y un 15%.

7.3 Significado Estratégico

Para los fabricantes de curvadoras de tubos, la capacidad de ofrecer una solución completa para el "conformado integrado de tubos completos" ha pasado de ser una ventaja opcional a ser un requisito indispensable para entrar en la cadena de suministro de sistemas de escape de gama alta. Las cinco tecnologías clave descritas en este libro blanco han sido verificadas y maduras en la producción real por SANCO GROUP, y pueden utilizarse como referencia directa para las actualizaciones de las líneas de producción por parte de los fabricantes de equipos originales (OEM) / proveedores Tier 1 de sistemas de escape.

8. Conclusión y Perspectivas

Este libro blanco analiza sistemáticamente la solución de conformado por curvado por tracción rotatoria integrada y sin soldadura para tubos de escape de aleación de titanio / acero inoxidable de pared delgada para motocicletas/automóviles bajo condiciones extremas de radio de curvado pequeño y secciones rectas cortas. Las conclusiones centrales son las siguientes:

1. Proceso de soldadura tradicional Presenta defectos sistemáticos en cinco dimensiones: corrosión, fatiga, campo de flujo, apariencia y coste, que son incompatibles con la tendencia de desarrollo de los sistemas de escape de gama alta;

2. Mediante la aplicación colaborativa de cinco tecnologías clave: matriz de curvado de carburo de tungsteno C12, mandril flexible multibola, matriz alisadora de cobre, matriz de sujeción dentada antideslizante y matriz de sujeción conformada de doble capa, se puede lograr el conformado integrado en condiciones extremas de $R/D \leq 1.5$, $t/D \leq 0.05$ y sección recta $L \rightarrow 0$;

3. La matriz de sujeción conformada de doble capa es una solución técnica original para resolver los desafíos de sujeción de secciones rectas cortas, con un valor de ingeniería y un significado de promoción significativos;

4. La solución integrada disminuye el coste total entre un 25 y un 35% en comparación con las soluciones de soldadura tradicionales, mientras que el rendimiento y la apariencia del producto mejoran integralmente.

Perspectivas de Futuro:

Inteligencia: integrar la inspección visual en línea y la compensación adaptativa de bucle cerrado para lograr un cambio de producción con "cero depuración";

Asistencia térmica: explorar el curvado asistido por calentamiento por inducción para reducir aún más el límite de R/D a 0.8D;

Impulsado por simulación: simulación CAE de todo el proceso para optimizar el avance del mandril y la curva de refuerzo, acortando el ciclo de prueba de la matriz;

Fabricación ecológica: eliminar los pasos de soldadura y rectificado mediante el conformado integrado, logrando una reducción sustancial de las emisiones de COV durante el proceso de fabricación.

La era de los tubos de escape integrados sin soldadura ha llegado. SANCO GROUP (www.sancomachine.com) está dispuesto a unirse a los fabricantes mundiales de sistemas de escape para promover conjuntamente esta transformación.

Apéndice A: Demostración en Vídeo de Ingeniería (con marcador de posición para código QR)

Este libro blanco ha reservado 5 marcadores de posición para vídeos de demostración de ingeniería a lo largo del texto, que se complementarán con grabaciones de campo posteriores. Los códigos QR pueden alojar vídeos a través de servicios de almacenamiento de objetos como Alibaba Cloud OSS / Tencent Cloud COS, y utilizar generadores de códigos QR (Recomendado: Caoliao QR Code / QR Code Monkey) para vincular enlaces cortos.

Especificaciones de vídeo sugeridas: resolución 1080P, formato MP4, duración de 30 a 90 s por segmento.

N.º	Tema del vídeo	Contenido recomendado	Capítulo correspondiente	Posición código QR
V-01	Comparación de rendimiento: soldado vs conformado monobloque	Corte transversal de soldadura + datos de banco de contrapresión	§1.3	[QR]
V-02	Montaje y puesta a punto de matrices C12	Instalación, centrado y curvado de prueba de matrices	§4.1	[QR]
V-03	Proceso de funcionamiento del mandril multiesférico	Grabación con matriz transparente o endoscopio	§4.2	[QR]
V-04	Ajuste en obra de la matriz antiarrugas	Reglaje de holgura con galga + comparación de resultados	§4.3	[QR]
V-05	Demostración de curvado con matriz de sujeción conformal de doble cavidad	Proceso completo desde carga hasta pieza terminada	§4.4	[QR]

Símbolo / Abreviatura	Significado	Unidad
D	Diámetro exterior del tubo	mm
t	Espesor de pared del tubo	mm
R	Radio de la línea central de curvatura	mm
R/D	Radio de curvatura relativo	—
t/D	Espesor relativo de pared	—
L	Longitud de tramo recto entre dos curvaturas	mm
θ	Ángulo de curvatura	° o rad
E _{max}	Máxima deformación de tracción de la pared exterior	—
σ_w	Tensión crítica de arrugado	MPa
F _t	Fuerza de tracción tangencial durante el curvado	N
F _{clamp}	Fuerza de sujeción	N
μ	Coefficiente de fricción	—
RDB	Rotary Draw Bending (curvado por tracción rotativo)	—
HAZ	Heat Affected Zone (zona afectada por el calor de soldadura)	—
WC-Co	Carburo cementado de wolframio-cobalto	—
QBe2	Grado de bronce de berilio	—

Símbolo / Abreviatura	Significado	Unidad
QA19-4	Grado de bronce de aluminio	—
DLC	Diamond-Like Carbon (recubrimiento tipo diamante)	—

Apéndice B: Símbolos y Glosario

Referencias

- [1] GB/T 12459-2017 Accesorios de tubería de acero soldados a tope — Tipos y parámetros.
- [2] ASME B31.3-2020 Código de tuberías de proceso.
- [3] Yang H., Zhan M. et al. «Recent developments in plastic bending of tubes», Journal of Materials Processing Technology, 2012.
- [4] Li H., Yang H., Zhan M. «A study on wrinkling in thin-walled tube bending», Chinese Journal of Aeronautics, 2010.
- [5] Wang Zhongren et al. Principios y tecnología del conformado plástico de tubos, Editorial de la Industria Mecánica, 2013.
- [6] Tang N. C. «Plastic-deformation analysis in tube bending», International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2000.
- [7] SAE J1817 Procedimiento de ensayo de sistemas de escape para motocicletas.
- [8] ISO 22766 Titanio y aleaciones de titanio — Tubos.

© 2026 SANCO GROUP Todos los derechos reservados Autor

Entidad editora: SANCO GROUP | Sitio web oficial: www.sancomachine.com

Si desea reproducir este documento o utilizarlo en propuestas comerciales, cite la fuente: SANCO GROUP (www.sancomachine.com).

— Fin del documento —