

Белая книга по технологии бесшовной гибки цельных выхлопных труб

— — Решение для формовки цельных тонкостенных выхлопных труб из нержавеющей стали и титановых сплавов для мотоциклов и автомобилей

Автор / Организация: SANCO GROUP

Официальный сайт: www.sancomachine.com

Версия: V1.0

Дата выпуска: Июль 2026 г.

Категория документа: Техническая белая книга / Технологическое предложение

Организация: SANCO GROUP (www.sancomachine.com)

Ключевые слова: Интегрированная гибка; Бесшовные выхлопные трубы; Тонкостенная нержавеющая сталь; Титановые сплавы; Малый радиус изгиба; Твердосплавные матрицы C12; Дорн; Разглаживающая планка; Профильная зажимная матрица; Ротационная вытяжная гибка

Аннотация

Выхлопные трубы для мотоциклов и автомобилей характеризуются четырьмя типичными технологическими особенностями: малый радиус изгиба ($R/D \leq 1,5$), малая толщина стенки ($t/D \leq 0,05$), высокопрочные материалы (нержавеющая сталь 304/316L, титановые сплавы Gr.2/Gr.9) и крайне короткие прямые участки между изгибами (вплоть до нуля). Традиционные решения используют метод «предварительно изготовленных колен + сварки», который, несмотря на простоту процесса, имеет ряд врожденных дефектов, таких как коррозия в зоне термического влияния сварного шва, турбулентность газового потока, снижение усталостной долговечности, плохая эстетическая однородность и высокие затраты на последующую обработку.

Данная белая книга, подготовленная SANCO GROUP (www.sancomachine.com) на основе многолетней инженерной практики предприятия по производству трубогибочных станков, систематически описывает решение для формовки цельных бесшовных выхлопных труб методом ротационной вытяжной гибки (Rotary Draw Bending, RDB). Благодаря синергетическому применению пяти ключевых технологий: гибочной матрицы из твердого сплава C12, многосферного гибкого дорна, медной разглаживающей планки, зажимной матрицы с

противоскользкой насечкой и двухслойной профильной зажимной матрицы, достигается бездефектная формовка цельных труб из труднодеформируемых тонкостенных материалов в экстремальных условиях: $1D \leq R \leq 1,5D$, $t/D \leq 0,05$, длина прямого участка $L \leq 0,5D$. В тексте приведены рекомендуемые значения основных параметров процесса, критерии выбора материалов для оснастки, технологические схемы и планы контроля качества, что предоставляет предприятиям по производству выхлопных труб воспроизводимый технический путь для перехода к «бессварному, облегченному и интегрированному» производству.

Содержание

1. Введение

2. Анализ технологических сложностей гибки выхлопных труб

3. Общее техническое решение для интегрированной бесшовной гибки

4. Подробное описание ключевых технологий процесса

- 4.1 Гибочная матрица из твердого сплава C12: выбор оснастки для высокопрочных материалов
- 4.2 Многошаровый гибкий дорн: предотвращение смятия тонких стенок и искажения сечения
- 4.3 Медная разглаживающая планка: подавление дефектов гофрообразования при малых радиусах изгиба
- 4.4 Зажимная матрица с насечкой и двухслойная профильная зажимная матрица: решение проблемы зажима на коротких прямых участках

5. Рекомендованные параметры процесса и сравнительная таблица выбора

6. Технологический процесс интегрированной формовки и контроль качества

7. Экономическая эффективность и значение для отрасли

8. Заключение и перспективы

Приложение А: Демонстрация инженерного видео (с QR-кодом)

Приложение Б: Список символов и терминов

Список литературы

1. Введение

1.1 Отраслевой контекст

Под влиянием глобальной стратегии «двойного углерода» и тенденции к облегчению конструкций мотоциклов и автомобилей, высокопроизводительные выхлопные системы, как один из ключевых компонентов силового агрегата, быстро эволюционируют в сторону уменьшения толщины стенок, снижения веса, повышения коррозионной стойкости и улучшения эстетики внешнего вида. На примере типичной выхлопной трубы среднего и хвостового сегментов высококлассных мотоциклов: наружный диаметр обычно составляет $\phi 38 \sim \phi 60$ мм, толщина стенки снизилась с прежних 1,5 мм до $0,8 \sim 1,0$ мм, материалы заменяются с обычной углеродистой стали на нержавеющую сталь 304, 316L и даже на чистый титан Gr.2 или титановый сплав Gr.9. При этом для обеспечения оптимального пути отвода газов в ограниченном пространстве шасси, детали обычно имеют несколько последовательных изгибов малого радиуса, между которыми практически отсутствуют прямые переходные участки.

1.2 Врожденные дефекты традиционной технологии сварки

Столкнувшись с такими жесткими геометрическими и материальными ограничениями, в отрасли широко применяется схема сегментированного производства: «предварительно изготовленные колена + прямые участки труб + ручная/автоматическая сварка». Эта схема имеет следующие существенные технические и экономические недостатки:

№	Категория дефекта	Проявление	Последствие
1	Металлургический дефект	Укрупнение зерен и сенсibilизация зоны термического влияния сварки (ЗТВ)	Стойкость к межкристаллитной коррозии снижается на 30–50%
2	Концентрация напряжений	В корне сварного шва часто образуются поры и несплавления	Усталостный ресурс снижается более чем на 40%
3	Турбулентность потока газов	Выступы и смещение кромок внутри сварного шва	Рост противодавления выхлопа, потеря мощности двигателя
4	Неравномерный внешний вид	Разница цвета и оксидные кольца на швах	Для премиальных автомобилей требуется повторная полировка / электролитическая обработка
5	Высокая совокупная себестоимость	Несколько операций: сварка, правка, шлифовка, проверка герметичности	Себестоимость одного изделия возрастает на 20–35%
6	Сложность сварки титановых сплавов	Титан при высоких температурах активно поглощает кислород и	Сварка проводится в камере с инертным газом,

№	Категория дефекта	Проявление	Последствие
		водород, что вызывает охрупчивание	производительность крайне низкая

1.3 Основной вопрос данного решения

Можно ли использовать один трубогибочный станок, одну цельную трубу и один цикл зажима, чтобы напрямую сформировать всю выхлопную трубу и полностью исключить сварные швы?

Ответ — да. В этой белой книге будет систематически доказано: при проведении целевого проектирования в четырех ключевых измерениях — выборе материалов оснастки, конструкции дорна, подавлении гофрообразования и методах зажима — можно стабильно достичь интегрированной формовки тонкостенных труднодеформируемых материалов с малыми радиусами, короткими прямыми участками и несколькими изгибами.

На рисунке 1 наглядно представлено сравнение внешнего вида традиционной сварной выхлопной трубы и трубы, изготовленной методом интегрированной формовки.



Рис. 1 Сравнение внешнего вида традиционной сварной выхлопной трубы (слева) и интегрированной бесшовной выхлопной трубы (справа) — —

© SANCO GROUP · www.sancomachine.com

📺 Видео 1: Демонстрация сравнения характеристик сварной выхлопной трубы и трубы, изготовленной методом цельной формовки

(Здесь зарезервировано место для видео и QR-кода. Рекомендуемое содержание видео: сечение сварного шва двух труб + сравнение данных на стенде для испытания противодавления.)

[QR Code Placeholder — 60 × 60 mm]

2. Анализ технологических сложностей гибки выхлопных труб

Перед подробным описанием решения необходимо прояснить четыре основные сложности гибки выхлопных труб на механическом уровне, которые являются отправной точкой для всего технологического проектирования в этой белой книге.

2.1 Концентрация деформации, вызванная малым радиусом изгиба

В процессе гибки наружная стенка трубы подвергается растягивающим напряжениям, внутренняя — сжимающим, а напряжения вблизи нейтрального слоя минимальны. Максимальную деформацию растяжения наружной стенки можно приближенно выразить как:

Где R — радиус осевой линии изгиба, D — наружный диаметр трубы. Когда $R/D = 1$ (т. е. изгиб $1D$), деформация составляет 50%, что значительно превышает запас равномерного удлинения нержавеющей стали 304 (около 45%), что легко приводит к утонению и растрескиванию наружной стенки; в то же время сжимающая деформация внутренней стенки вызывает потерю устойчивости материала и образование гофр. С уменьшением радиуса изгиба на каждую единицу D сложность формовки возрастает нелинейно.

2.2 Смятие сечения, вызванное тонкой стенкой

Способность трубы сопротивляться деформации сечения пропорциональна кубу толщины стенки. При $t/D \leq 0,02$ (например, труба $\phi 50 \times 1,0$ мм) внутренняя стенка в зоне изгиба под давлением склонна к смятию внутрь полости трубы, образуя дефекты типа «кошачья спина» (cat-back) или овальность; при этом утонение наружной стенки приводит к типичному грушевидному искажению сечения, что напрямую влияет на площадь проходного сечения и эстетическое качество.

2.3 Высокое сопротивление деформации, обусловленное материалом

Предел текучести нержавеющей стали 304 ≥ 205 МПа, предел прочности при растяжении ≥ 520 МПа; титановый сплав Gr.9 (3Al-2.5V) имеет предел текучести ≥ 620 МПа и значительное деформационное упрочнение, что предъявляет чрезвычайно высокие требования к твердости и

чистоте поверхности оснастки. Кроме того, титановые сплавы имеют сильную склонность к налипанию на матрицу, что легко приводит к образованию холодного схватывания в канавках оснастки и появлению задиров на поверхности трубы.

2.4 Недостаточная длина зажима, вызванная короткими прямыми участками

Теоретически эффективная длина зажима зажимной матрицы при ротационной вытяжной гибке должна составлять $\geq 2 \sim 3$ диаметров трубы, чтобы гарантировать отсутствие проскальзывания при максимальном изгибающем моменте. Однако прямой участок L между двумя изгибами выхлопной трубы часто меньше $1D$, а в некоторых конструкциях $L \approx 0$. В этом случае обычная зажимная матрица с плоскими канавками, независимо от конструкции, не может обеспечить достаточную площадь зажима, и в процессе гибки неизбежно произойдет тангенциальное проскальзывание, что приведет к неконтролируемому углу изгиба и разрыву наружной стенки.

3. Общее техническое решение для интегрированной бесшовной гибки

В ответ на четыре вышеупомянутые сложности, данное решение (предложенное SANCO GROUP) выстраивает систематическую технологическую архитектуру «один станок, две матрицы, три контроля»:

Один станок: высокожесткий трубогибочный станок с ЧПУ для ротационной вытяжной гибки (Rotary Draw Bender, RDB), крутящий момент шпинделя $\geq 8000 \text{ Н}\cdot\text{м}$, точность позиционирования $\pm 0,05^\circ$;

Две матрицы: гибочная матрица из твердого сплава C12 как активный рабочий элемент и медная разглаживающая планка как пассивный элемент подавления дефектов;

Три контроля: Геометрический контроль — многосаровый гибкий дорн обеспечивает контроль геометрии сечения;

Контроль стабильности — разглаживающая планка + устройство поджима (бустер) обеспечивают подавление потери устойчивости;

Контроль фиксации — зажимная матрица с насечкой / двухслойная профильная зажимная матрица обеспечивают стабильный зажим на крайне коротких прямых участках.

Синергетическая связь между пятью ключевыми технологиями может быть суммирована в следующей таблице:

Технологическая сложность	Основная технология решения	Вспомогательная технология
Малый радиус изгиба → образование складок	Медная противоскладочная матрица	Точная регулировка вылета оправки
Тонкая стенка → обрушение сечения	Гибкая многокатковая оправка	Усилие заднего толкателя
Высокопрочный материал → износ матрицы, холодная сварка	Твердосплавная матрица для изгиба C12	Покрытие поверхности TiN / DLC
Сверхкороткий прямой участок → скольжение при зажиме	Зажимная матрица с противоскользящей насечкой + двухполостная копирующая матрица	Увеличение усилия зажима

В последующих разделах подробно описываются принципы действия, ключевые моменты проектирования и меры предосторожности при реализации этих пяти ключевых технологий.

4. Подробное описание ключевых технологий процесса

4.1 Гибочная матрица из твердого сплава C12: выбор оснастки для высокопрочных материалов

4.1.1 Логика выбора материала

Гибочная матрица является самым сложным по нагрузкам и наиболее подверженным износу основным исполнительным элементом среди всей оснастки трубогибочного станка. Ее внутренняя канавка должна совершать относительное скольжение с трубой под действием огромных контактных напряжений. Если твердость матрицы будет недостаточной, быстро возникнут такие формы отказа, как смятие канавки, отслоение кромок и шероховатость поверхности. Сравнение характеристик материалов, обычно используемых для гибочных матриц, приведено ниже:

Материал	Твердость по Роквеллу (HRC)	Ударная вязкость	Стойкость к износу	Стоимость обработки	Сфера применения
Сталь 45# среднеуглеродистая	25 ~ 30	★★★★★	★	Низкая	Прототипные испытания, трубы из мягкой меди/алюминия
42CrMo легированная сталь	38 ~ 42	★★★★★	★★★	Средняя	Обычные трубы из углеродистой стали
Cr12MoV инструментальная сталь	55 ~ 60	★★★	★★★★★	Средне-высокая	Массовое производство деталей из нержавеющей стали
Твердый сплав C12 (WC-Co)	≥ 88 (HRA) / эквивалент ~72 HRC	★★	★★★★★	Высокая	Тонкостенные трубы из нержавеющей стали и титановых сплавов

C12 — это типичная марка вольфрамокобальтового твердого сплава со средним содержанием кобальта (содержание Co 6 ~ 10%) (относится к системе универсальных твердых сплавов для режущего инструмента класса K). Его макротвердость достигает HRA 88 и выше (что значительно превышает HRC 60 для легированной инструментальной стали), а износостойкость примерно в 5 ~ 8 раз выше, чем у Cr12MoV. При этом его предел прочности на изгиб может достигать 2500 ~ 3000 МПа, что достаточно, чтобы выдерживать контактное давление в десятки кН в процессе гибки тонкостенных труб из нержавеющей стали.

4.1.2 Ключевые моменты конструктивного проектирования

Соответствие радиуса канавки: радиус канавки = $0,5D + 0,02 \sim 0,05$ мм (компенсация отрицательного допуска), чтобы избежать «всплытия» трубы;

Шероховатость поверхности канавки: $Ra \leq 0,4$ мкм, зеркальная полировка; для титановых сплавов следует дополнительно нанести покрытие TiN / DLC, чтобы снизить коэффициент трения до уровня менее 0,1; синхронная модернизация зажимной матрицы, разглаживающей планки и прижимной матрицы; поскольку твердость гибочной матрицы C12 намного выше, чем у сопряженной оснастки, если сопряженная оснастка по-прежнему изготовлена из обычной стали,

она будет подвергаться обратному износу со стороны C12, поэтому

рекомендуется комплектовать ключевые части деталями из твердого сплава;

Технология термообработки и сборки вставок: материал C12 довольно хрупкий,

поэтому обычно используется композитная структура со стальным основанием +

вставки из твердого сплава, что сочетает в себе твердость и ударопрочность;

вставки фиксируются высокотемпературной пайкой или прецизионными болтами

для удобства частичной замены.

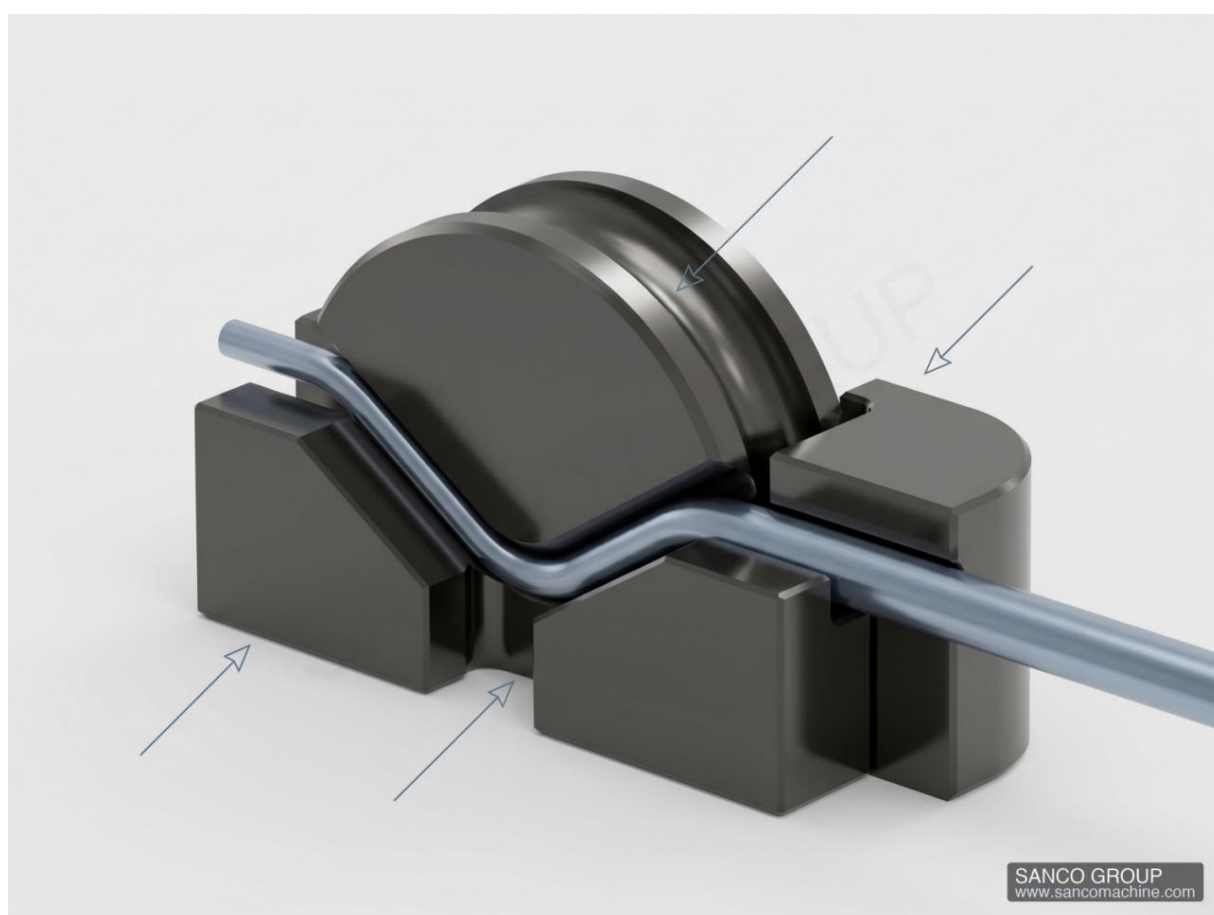


Рис. 2 Рендер разреза гибочной матрицы из твердого сплава C12 (включая комплект из гибочной, зажимной и прижимной матриц) — —© SANCO GROUP · www.sancomachine.com

📺 Видео 2: Демонстрация сборки и отладки оснастки из твердого сплава C12

(Здесь зарезервировано место для видео и QR-кода. Рекомендуемое содержание видео: полный процесс от распаковки, установки и центровки до пробной гибки.)

[QR Code Placeholder — 60 × 60 mm]

4.2 Многошаровый гибкий дорн: предотвращение смятия тонких стенок и искажения сечения

4.2.1 Механическое действие дорна

Дорн (Mandrel) является основным внутренним опорным элементом для контроля формы сечения тонкостенной трубы. Его суть заключается в обеспечении жесткой опорной поверхности внутри полости трубы в зоне изгиба, близкой к внутреннему диаметру трубы, для сопротивления силе смятия внутренней стенки внутрь и ограничения тенденции к овальности наружной стенки.

4.2.2 Выбор формы дорна

Описание конструкции	Опорная способность	Применимое отношение R/D	Примечание	Пробковый (жесткий) дорн
Односоставный цилиндрический	Слабая	$\geq 3D$	Только толстостенные трубы	Одношаровый дорн
1 шар	Средняя	$2D \sim 3D$	Средняя толщина стенки	Многошаровый дорн (3 ~ 5 шаров)
Многошаровая цепь, шарнирное соединение	Сильная	$1D \sim 1.5D$	Рекомендуется для тонкостенных выхлопных труб	Гибкий тросовый дорн
Внутренняя стальная тросовая цепь	Очень сильная	$0.8D \sim 1D$	Экстремальные условия эксплуатации	Материал

Для типичных условий гибки выхлопных труб с малым радиусом $1D \sim 1,5D$ и тонкой стенкой рекомендуется гибкий дорн с 3 ~ 5 шарами. Эмпирическая формула для расчета количества шаров:

Где θ — угол изгиба (в радианах), R — радиус изгиба, p — шаг между шарами (обычно принимается $1,0 \sim 1,2 D$).

4.2.3 Ключевые параметры дорна

Допуск на диаметр шара: $D_{\text{шара}} = D_{\text{внутр}} - (0,15 \sim 0,25)$ мм, то есть зазор

дорна контролируется в пределах $0,15 \sim 0,25$ мм; слишком большой зазор

→ неконтролируемое смятие, слишком малый зазор → задиры / заклинивание;

Вылет (Pitch): расстояние выдвижения головки дорна относительно точки касания

(тангеса), обычно $e = (1/3 \sim 2/3) \cdot D$; слишком большой вылет приводит к чрезмерному утонению наружной стенки, слишком малый — к гофрообразованию на внутренней стенке;

Материал дорна: корпус рекомендуется из стали SKD11 или H13 с закалкой до HRC 58 ~ 62, покрытие TiN / CrN / DLC, коэффициент трения $\leq 0,15$;

Способ смазки: при гибке титановых сплавов обязательно использовать масло для гибки труб под высоким давлением с экстремальными характеристиками, непрерывно подаваемое в зону изгиба через внутреннее отверстие стержня дорна.

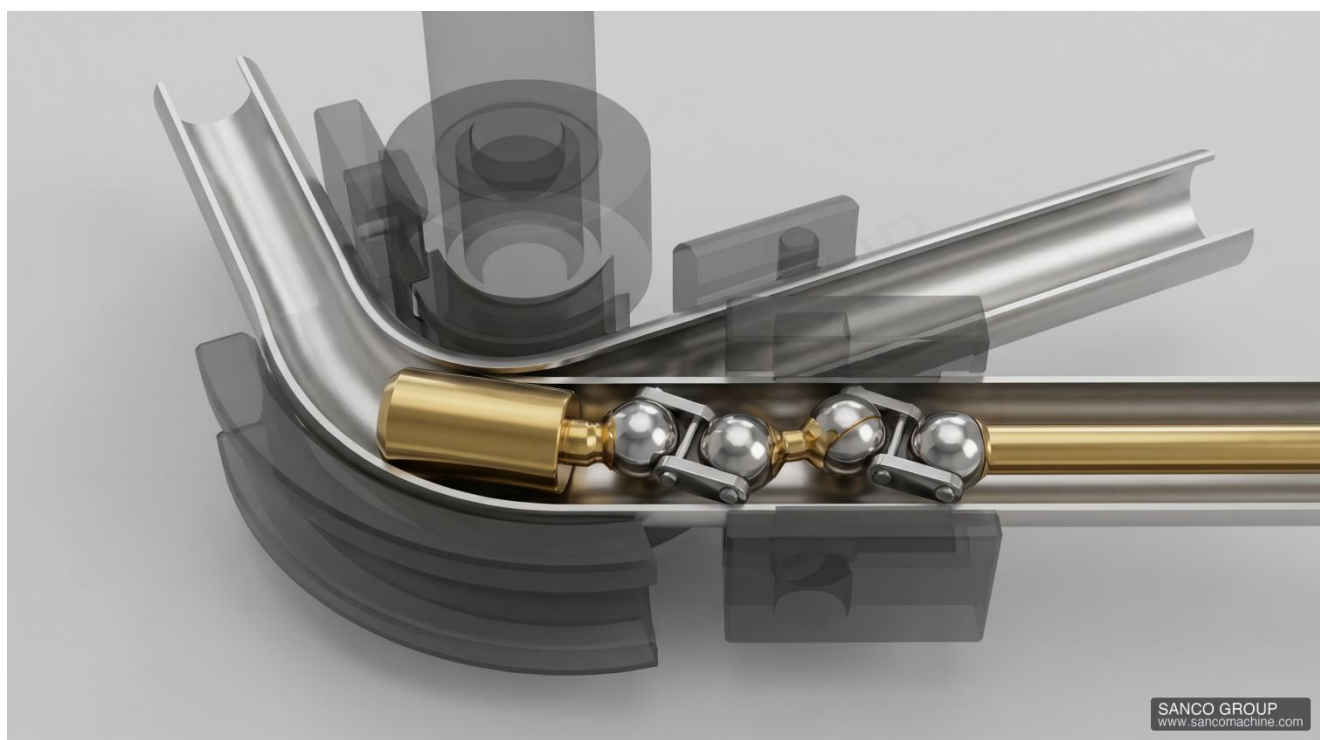


Рис. 3 Схема работы многошарового гибкого дорна (Multi-ball Mandrel) внутри тонкостенной трубы (разрез трубы показывает внутреннюю структуру) — —

© SANCO GROUP · www.sancomachine.com

📺 Видео 3: Реальный процесс работы многошарового дорна в тонкостенной трубе из нержавеющей стали

(Здесь зарезервировано место для видео и QR-кода. Рекомендуемое содержание видео: испытание с прозрачной матрицей или промышленная эндоскопия.)

[QR Code Placeholder — 60 × 60 mm]

4.3 Медная разглаживающая планка: подавление дефектов гофрообразования при малых радиусах изгиба

4.3.1 Механизм гофрообразования

При гибке с малым отношением R/D материал на внутренней стороне зоны изгиба подвергается действию тангенциальных сжимающих напряжений. Как только сжимающее напряжение превышает критическое значение потери устойчивости, возникают продольные волнообразные складки (гофры). Теоретически критическое условие потери устойчивости трубы при гофрообразовании приближенно равно:

Где K — коэффициент ограничения (обычно $0,6 \sim 1,2$), E — модуль упругости. Когда R/D крайне мал, а t/D крайне мал, σ_{cr} резко падает, и гофрообразование становится почти неизбежным.

4.3.2 Принцип действия разглаживающей планки (Wiper Die)

Разглаживающая планка — это клиновидный инструмент, устанавливаемый за точкой касания гибки и плотно прилегающий к внутренней стороне изгиба трубы. Ее функция заключается в том, чтобы прижимать и «счищать» складки назад в момент их зарождения, предотвращая их дальнейшее развитие и накопление в зоне изгиба.

4.3.3 Почему медь (бронза / бериллиевая медь)?

Материал	Твердость (HВ)	Коэффициент трения	Риск царапания титана/нержавеющей стали	Вывод
Закаленная сталь	350 ~ 450	0,25 ~ 0,35	Высокий риск	✗ Не рекомендуется
Алюминиевая бронза QAl9-4	170 ~ 200	0,10 ~ 0,15	Низкий риск	✓ Рекомендуется
Бериллиевая бронза QBe2	≈ 380	0,08 ~ 0,12	Низкий риск	✓ Настоятельно рекомендуется (для титановых сплавов)
Композитное покрытие MoS ₂ / графит	—	0,05 ~ 0,08	Отсутствует	✓ Вспомогательное поверхностное покрытие

Ключевое преимущество медных сплавов перед закаленной сталью заключается в том, что они не оставляют задиров на поверхности нержавеющей стали и титановых сплавов, а их свойства самосмазки значительно снижают склонность к адгезии между металлами. Бериллиевая бронза (QBe2) особенно хороша по твердости и износостойкости, являясь

предпочтительным материалом для разглаживающих планок при гибке титановых выхлопных труб.

4.3.4 Установка и регулировка разглаживающей планки

Выравнивание по точке касания: кончик планки должен быть точно совмещен с точкой касания гибки, отклонение $\leq 0,1$ мм;

Длина контакта: обычно составляет $2 \sim 3D$;

Зазор прилегания: зазор со стенкой трубы $0,02 \sim 0,05$ мм, «едва касаясь»;

Угол атаки (Rake Angle): $0^\circ \sim 3^\circ$, небольшой наклон к внутренней стороне трубы;

Для титановых сплавов: рекомендуется перешлифовывать кончик через каждые $500 \sim 1000$ гибов, чтобы обеспечить остроту.



Рис. 4 Схема расположения медной разглаживающей планки (Wiper Die) в устройстве ротационной вытяжной гибки — © SANCO GROUP · www.sancomachine.com

📺 Видео 4: Обучение регулировке разглаживающей планки на месте

(Здесь зарезервировано место для видео и QR-кода. Рекомендуемое содержание видео: техник регулирует зазор планки щупом + сравнение результатов пробной гибки.)

[QR Code Placeholder — 60 × 60 mm]

4.4 Зажимная матрица с насечкой и двухслойная профильная зажимная матрица: решение проблемы зажима на коротких прямых участках

4.4.1 Физические вызовы зажима на коротких прямых участках

В процессе гибки зажимная матрица должна выдерживать тангенциальную силу растяжения F_t и возникающую при этом сдвиговую составляющую. При недостаточной эффективной длине зажима силы трения между матрицей и трубой недостаточно для сопротивления тангенциальному растяжению, труба «вытягивается», что приводит к:

- Недостаточному углу изгиба;
- Чрезмерному утонению наружной стенки и даже растрескиванию;
- Искажению кривизны предыдущего изгиба из-за «обратного затягивания».

В условиях, когда площадь зажима не может быть увеличена (ограничена геометрией прямых участков изделия), прорыв возможен только в двух направлениях: ① повышение эквивалентного коэффициента трения μ ; ② изменение геометрической формы зажима, позволяющее «уже сформированному изгибу» также участвовать в зажиме.

4.4.2 Вариант А: Зажимная матрица с насечкой (Anti-slip Serrated Clamp Die)

На поверхности канавки зажимной матрицы прецизионно вырезается микро-треугольный или ромбовидный зубчатый узор (высота зуба 0,05 ~ 0,10 мм, шаг 0,5 ~ 1,0 мм), создающий микро-зацепление между матрицей и стенкой трубы. Это повышает эквивалентный коэффициент трения с 0,15 до 0,4 ~ 0,6, а силу зажима — в 3 ~ 4 раза.

Тип насечки	Высота зуба	Шаг насечки	Сфера применения
Прямые насечки	0,05 мм	0,5 мм	Высокие требования к чистоте поверхности
Ромбические насечки	0,08 мм	0,8 мм	Универсальный рекомендуемый вариант
Треугольные поперечные насечки	0,10 мм	1,0 мм	Режимы высокого крутящего момента, допустимы небольшие вмятины

⚠ Меры предосторожности: зубчатый профиль оставит небольшие отпечатки на внешней

поверхности трубы. Для открытых хвостовых секций выхлопных труб рекомендуется сначала провести противоскользкую обработку, а затем вторичную полировку; для средних секций, установленных внутри автомобиля, это совершенно не влияет на эксплуатацию.

4.4.3 Вариант Б: Двухслойная профильная зажимная матрица (Dual-cavity Conformal Clamp Die)

— ключевая инновация

Когда прямой участок между двумя изгибами $L < 0,5D$, или даже $L \approx 0$ (то есть конец предыдущего изгиба является началом текущего), любая зажимная матрица с прямой канавкой не сможет обеспечить достаточную площадь зажима. В этом случае остается только изменить геометрию матрицы:

Основная идея: изготовить нижнюю канавку зажимной матрицы в виде профильной канавки, точно соответствующей предыдущему сформированному изгибу, чтобы «уже согнутая часть» входила непосредственно в зажимную матрицу и участвовала в зажиме вместе с новым прямым участком трубы.

Таким образом, эффективная длина зажима больше не ограничивается «оставшимся прямым участком», а расширяется на всю длину дуги предыдущего изгиба, что позволяет получить в 3 ~ 5 раз большую эффективную площадь зажима. При этом верхняя канавка остается стандартной прямой канавкой для зажима еще не согнутой части.

Параметр	Рекомендуемое значение	Описание
Перепад высот между верхней и нижней канавками	$= D + 2 \text{ мм}$	Исключает взаимное перекрытие уже согнутого и нового участка трубы
Радиус копирующей канавки	Равен радиусу предыдущего изгиба	Должен повторять чертеж изделия в масштабе 1:1
Угол охвата копирующей канавки	Равен углу предыдущего изгиба	Эффективность достигается при угле $\geq 45^\circ$
Материал	Cr12MoV / C12	Тот же класс, что и основная зажимная матрица
Тип насечки	Допускается комбинация с ромбическими противоскользкими насечками	Наилучший комплексный результат

Наибольшее инженерное значение этого решения заключается в том, что оно превращает «геометрический конфликт» в «геометрическую анкеровку», благодаря чему самые сложные условия с короткими прямыми участками обеспечивают максимальную удерживающую

способность. Это ключ к реализации интегрированного бессварного решения для экстремальных конструкций выхлопных труб, пропагандируемого в данной белой книге.



Рис. 5 Схема работы двухслойной профильной зажимной матрицы (Dual-cavity Conformal Clamp Die) при зажиме заготовки с коротким прямым участком ($L \approx 0$) — —

© SANCO GROUP · www.sancomachine.com

📺 Видео 5: Демонстрация реальной гибки выхлопной трубы с короткими прямыми участками с использованием двухслойной профильной матрицы

(Здесь зарезервировано место для видео и QR-кода. Рекомендуемое содержание видео: полная съемка всего процесса от загрузки → первый изгиб → переустановка → второй изгиб (без прямого участка).)

5. Рекомендованные параметры процесса и сравнительная таблица выбора

Основываясь на вышеприведенном анализе, в этом разделе представлены рекомендуемые параметры процесса для типичных изделий выхлопных труб при различных материалах и геометрических условиях для непосредственного использования в инженерной практике. Эта система параметров составлена SANCO GROUP (www.sancomachine.com) на основе многолетней производственной практики.

5.1 Сводная таблица выбора: Материал × Спецификация × R/D

Материал	Типовой размер (D × t, мм)	Рекомендуемое R/D	Количество катков оправки	Материал противоскользящей матрицы	Тип зажимной матрицы	Масло для гибки
Нерж. сталь 304	φ38 × 1,0	1,5	3 катка	Алюминиевая бронза QA19-4	С насечкой против скольжения	Масло экстремальных давлений общего назначения
Нерж. сталь 304	φ50 × 1,0	1,2	4 катка	Алюминиевая бронза QA19-4	Насечка + двухполостная копирующая	Масло ЭД общего назначения
Нерж. сталь 316L	φ50 × 0,8	1,5	4 катка	Алюминиевая бронза QA19-4	С насечкой против скольжения	Специальное масло для нержавеющей стали
Нерж. сталь 316L	φ60 × 0,8	1,2	5 катков	Бериллиевая бронза QBe2	Двухполостная копирующая	Специальное масло для нержавеющей стали
Чистый титан Gr.2	φ50 × 1,0	1,5	4 катка	Бериллиевая бронза QBe2	Насечка + двухполостная копирующая	Хлорированный парафиновое масло для титановых сплавов
Титановый сплав Gr.9	φ50 × 0,8	2,0	5 катков	Бериллиевая бронза QBe2	Двухполостная копирующая	Хлорированный парафиновое масло для титановых сплавов

5.2 Справочная таблица ключевых геометрических параметров

Параметр	Обозначение	Рекомендуемый диапазон	Влияние
Относительный радиус изгиба	R/D	1,0 ~ 2,0	Меньшее значение усложняет формование
Относительная толщина стенки	t/D	0,015 ~ 0,05	Чем меньше показатель, тем сложнее гибка
Зазор оправки	c	0,15 ~ 0,25 мм	Большой зазор вызывает обрушение сечения, малый — царапины трубы

Параметр	Обозначение	Рекомендуемый диапазон	Влияние
Вылет оправки	e	$(1/3 \sim 2/3) \cdot D$	Регулирует степень утончения внешней стенки
Длина контакта противоскладочной матрицы	Lw	$2 \sim 3 \cdot D$	Определяет эффективность подавления складок
Эффективная длина зажима	Lc	$\geq 2 \cdot D$ (стандарт) или $\geq 0,5 \cdot D$ с копирующей канавкой	Определяет риск скольжения трубы при гибке
Соотношение скорости толкателя и скорости гибки	v_boost / v_bend	0,95 ~ 1,05	Выравнивает утончение внешней стенки трубы

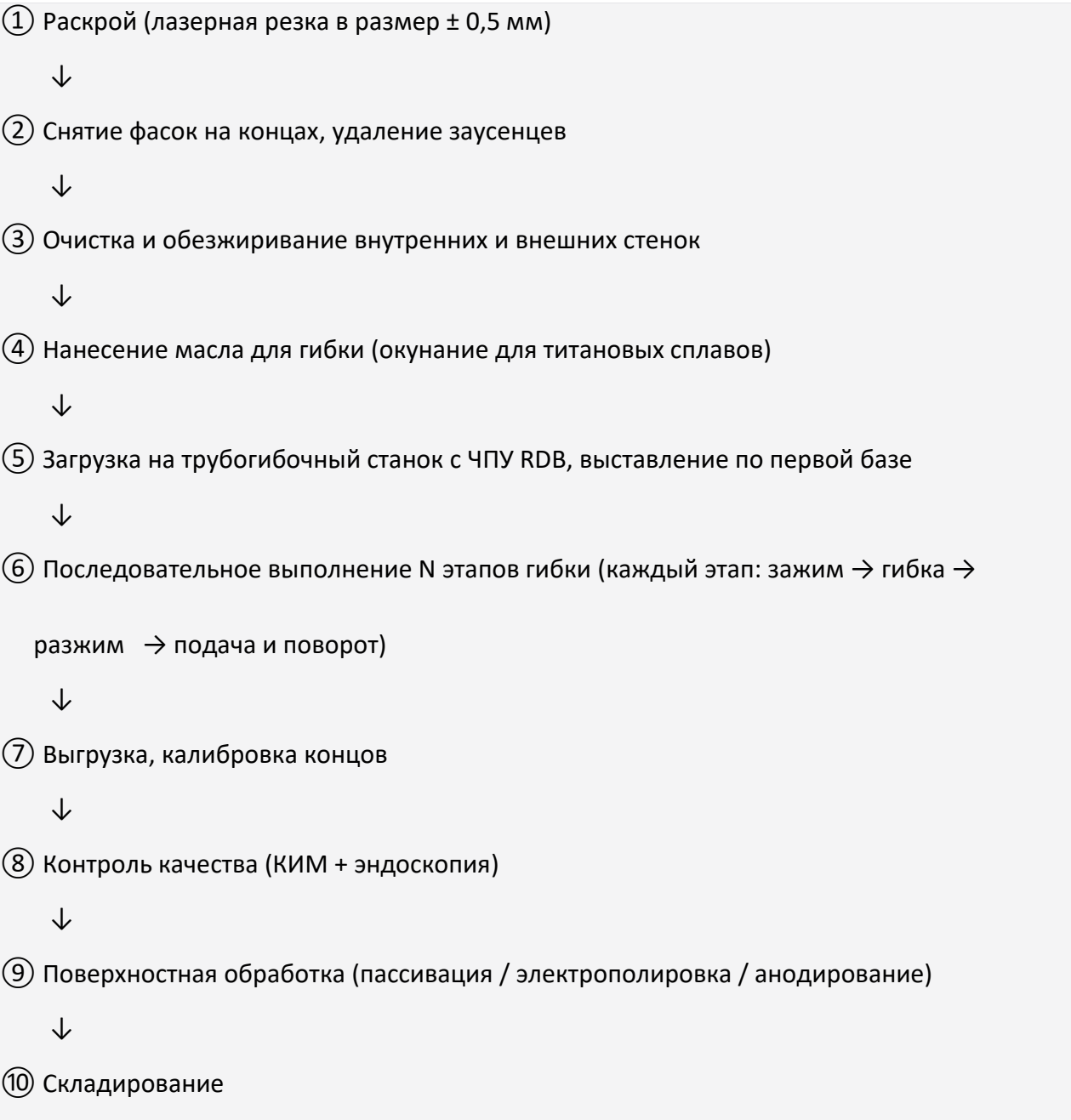
5.3 Диагностика и меры по устранению распространенных дефектов

Проявление дефекта	Вероятные причины	Меры устранения
Растрескивание внешней стенки	Слишком большой вылет оправки / Недостаточное усилие толкателя	Уменьшить вылет оправки, увеличить усилие толкателя
Складки на внутренней стенке	Слишком большой зазор противоскладочной матрицы / Смещение назад	Перешлифовать наконечник матрицы, сдвинуть вперед на 0,1–0,2 мм
Обрушение сечения трубы	Мало катков оправки / Слишком большой зазор оправки	Добавить катки, уменьшить зазор между оправкой и трубой
Царапины на поверхности трубы	Недостаточная смазка / Шероховатая поверхность матриц	Заменить масло на экстремально-прессовое, зеркальная полировка матриц
Скольжение трубы в зажиме	Недостаточная длина зажима / Низкий коэффициент трения	Использовать матрицу с насечкой или двухполостную копирующую матрицу
Недостаточный угол изгиба	Недостаточный запас на упругую обратную деформацию	Добавить перегиб на 2–5°
Изменение цвета поверхности титанового сплава	Перегрев при формовании / Разрыв смазочной пленки	Снизить скорость гибки, усилить охлаждение и смазку

6. Технологический процесс интегрированной формовки и контроль качества

6.1 Полный технологический процесс

Полный цикл производства интегрированной бесшовной выхлопной трубы выглядит следующим образом:



6.2 Синхронизация трех ключевых движений трубогибочного станка

В течение одного этапа гибки станок должен обеспечить строгую синхронизацию трех движений:

Действие	Исполнительный узел	Ключевые регулируемые параметры
Изгиб	Шпиндель + матрица для изгиба	Угол, скорость, крутящий момент
Толкание	Толкающая каретка	Усилие толкания, скорость толкания
Зажим	Зажимная матрица	Усилие зажима, последовательность открытия/закрытия

Отсутствие синхронизации этих трех факторов напрямую приведет к: растрескиванию

наружной стенки (недостаточный поджим), гофрообразованию на внутренней стенке (избыточный поджим) или задирам на поверхности (ошибка в последовательности зажима).
Рекомендуется использовать модели RDB с ЧПУ с замкнутым контуром крутящего момента и контролем силы поджима.

6.3 Показатели контроля качества (QC Metrics)

Контролируемый показатель	Метод проверки	Критерий годности
Степень утончения внешней стенки	Ультразвуковой толщиномер / Разрез изделия	$\leq 20\%$
Высота складок внутренней стенки	Эндоскоп + оптическое измерение	$\leq 0,05 \cdot t$
Овальность сечения	Координатно-измерительная машина (КИМ)	$\leq 5\%$
Точность угла изгиба	Координатно-измерительная машина (КИМ)	$\pm 0,3^\circ$
Линейный размер длины	Координатно-измерительная машина (КИМ)	$\pm 0,5 \text{ мм}$
Шероховатость поверхности	Шероховатометр	$Ra \leq 1,6 \text{ мкм}$
Царапины на поверхности	Визуальный контроль + 10-кратная лупа	Отсутствие видимых царапин невооруженным глазом

7. Экономическая эффективность и значение для отрасли

7.1 Сравнение стоимости одного изделия (на примере типичной выхлопной трубы среднего сегмента мотоцикла)

Статья затрат	Сварочный технологический процесс	Интегрированное цельное формование	Изменение
Сырье и материалы	100% (базис)	105% (+5%)	+5%
Время на гибку / сварку	45 мин	8 мин	-82%
Расходные материалы для сварки (инертный газ)	Требуются	Отсутствуют	-100%
Правка / шлифовка	20 мин	3 мин	-85%
Проверка герметичности	Обязательная операция	Исключена полностью	-100%

Статья затрат	Сварочный технологический процесс	Интегрированное цельное формование	Изменение
Процент брака	5 ~ 8%	1 ~ 2%	-70%
Полная себестоимость одного изделия	100%	65 ~ 75%	-25 ~ 35%

7.2 Преимущества в производительности и внешнем виде

Снижение противодавления: выступы сварного шва на внутренней стенке исчезают, потери потока снижаются на 3 ~ 8%;

Усталостная долговечность: отсутствие зоны термического влияния, ресурс на усталостном стенде увеличивается на 40 ~ 60%;

Коррозионная стойкость: устранение зоны сенсibilизации, срок службы в соляном тумане увеличивается в 2 ~ 3 раза;

Эстетическое качество: зеркальная однородность всей трубы напрямую соответствует эстетическим требованиям высококлассных моделей;

Облегчение конструкции: можно использовать более тонкостенные материалы, снижение веса всей трубы на 8 ~ 15%.

7.3 Стратегическое значение

Для производителей трубогибочных станков способность предоставить комплексное решение «интегрированной формовки цельной трубы» превратилась из опционального преимущества во входной билет в цепочку поставок высококлассных выхлопных систем. Пять ключевых технологий, описанных в этой белой книге, проверены и отработаны в реальном производстве компанией SANCO GROUP и могут служить прямым ориентиром для модернизации производственных линий автопроизводителей и поставщиков Tier 1.

8. Заключение и перспективы

В этой белой книге систематически изложено решение для интегрированной бесшовной ротационной вытяжной гибки выхлопных труб из тонкостенной нержавеющей стали и титановых сплавов для мотоциклов и автомобилей в экстремальных условиях малых радиусов изгиба и

коротких прямых участков. Основные выводы:

Традиционная технология сварки

1. имеет системные недостатки в пяти измерениях: коррозия, усталость, поток, внешний вид и стоимость, что не соответствует тенденциям развития высококлассных выхлопных систем;
2. Благодаря синергетическому применению пяти ключевых технологий: гибочной матрицы из твердого сплава C12, многошарового гибкого дорна, медной разглаживающей планки, зажимной матрицы с насечкой и двухслойной профильной зажимной матрицы, можно достичь формовки цельной трубы за один цикл в экстремальных условиях $R/D \leq 1,5$, $t/D \leq 0,05$ и $L \rightarrow 0$;
3. Двухслойная профильная зажимная матрица является оригинальным технологическим решением проблемы зажима на коротких прямых участках, обладающим значительной инженерной ценностью и потенциалом для широкого внедрения;
4. Интегрированное решение снижает общие затраты на изделие на 25 ~ 35% по сравнению с традиционной технологией сварки при одновременном повышении характеристик и эстетики продукта.

Перспективы на будущее:

Интеллектуализация: интеграция онлайн-визуального контроля и адаптивной компенсации с замкнутым контуром для перехода на переналадку «с нулевой отладкой»;

Термическая поддержка: исследование гибки с индукционным нагревом для дальнейшего снижения предела R/D до 0,8D;

Моделирование: оптимизация вылета дорна и кривых поджима с помощью сквозного CAE-моделирования для сокращения циклов испытаний оснастки;

Экологичное производство: исключение этапов сварки и шлифовки при интегрированной формовке обеспечивает существенное снижение выбросов ЛОС в процессе производства.

Эра интегрированных бесшовных выхлопных труб уже наступила. SANCO GROUP (www.sancomachine.com) готова сотрудничать с мировыми производителями выхлопных систем для совместного продвижения этой трансформации.

Приложение А Демонстрация инженерного видео (с QR-кодом)

В тексте данной белой книги зарезервировано 5 мест для демонстрационных видео инженерных процессов для последующего дополнения реальными съемками. QR-коды могут вести на видео, размещенные в объектных хранилищах типа Alibaba Cloud OSS / Tencent Cloud COS, с использованием генераторов QR-кодов (рекомендуется: Caoliao QR / QR Code Monkey) с привязкой коротких ссылок. Рекомендуемые характеристики видео: разрешение 1080P, формат MP4, длительность одного фрагмента 30 ~ 90 сек.

№	Тема видео	Рекомендуемое содержание	Соответствующий раздел	Место QR-кода
V-01	Сравнение характеристик сварной и цельногнутой трубы	Разрез сварного шва + данные стенда противодавления	§1.3	[QR]
V-02	Сборка и наладка матриц C12	Монтаж матриц, центровка, пробная гибка	§4.1	[QR]
V-03	Работа многокатковой оправки	Съемка через прозрачную матрицу или эндоскоп	§4.2	[QR]
V-04	Полевая регулировка противоскладочной матрицы	Регулировка зазора щупом + сравнение результатов	§4.3	[QR]
V-05	Демонстрация гибки с двухполостной копирующей матрицей	Полный цикл от загрузки до готового изделия	§4.4	[QR]

Обозначение / Аббревиатура	Значение	Ед. изм.
D	Внешний диаметр трубы	мм
t	Толщина стенки трубы	мм
R	Радиус срединной линии изгиба	мм
R/D	Относительный радиус изгиба	—
t/D	Относительная толщина стенки	—
L	Длина прямого участка между двумя изгибами	мм
θ	Угол изгиба	° или рад
$\varepsilon_{\max}$	Максимальная растягивающая деформация внешней стенки	—
σ_{cr}	Критическое напряжение образования складок	МПа

F_t	Тангенциальная тяговая сила при гибке	Н
F_{clamp}	Усилие зажима	Н
μ	Коэффициент трения	—
RDB	Rotary Draw Bending (ротационная вытяжная гибка)	—
HAZ	Heat Affected Zone (зона термического влияния сварки)	—
WC-Co	Вольфрам-кобальтовый твердый сплав	—
QBe2	Марка бериллиевой бронзы	—
QA19-4	Марка алюминиевой бронзы	—
DLC	Diamond-Like Carbon (покрытие типа алмаза)	—

Приложение Б Список символов и терминов

Список литературы

- [1] GB/T 12459-2017 «Стальные фитинги для сварки встык. Типы и параметры».
- [2] ASME B31.3-2020 «Кодекс по технологическим трубопроводам».
- [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. «Принципы и технологии пластической обработки труб», Издательство машиностроения, 2013.
- [6] Tang N. C. «Plastic-deformation analysis in tube bending», International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2000.
- [7] SAE J1817 «Процедура испытаний выхлопных систем мотоциклов».

[8] ISO 22766 «Титан и титановые сплавы — Трубы».

© 2026 SANCO GROUP Все права защищены

Автор / Организация: SANCO GROUP

Официальный сайт: www.sancomachine.com

При перепечатке или использовании в коммерческих предложениях просьба указывать источник: SANCO GROUP (www.sancomachine.com).

— — Конец документа — —