

Innowacyjna bezodpadowa technologia kształtowania odśrodkowego zakończeń rur stalowych – od koncepcji do prototypu przemysłowego

Data wpłynięcia do Redakcji: 12/2025
Data akceptacji przez Redakcję do publikacji: 12/2025

2025, volume 14, issue 1, pp. 128-136

Marcin Świątek, Darya Kavaleuskaya
Expert Solutions Sp. z o. o., Poland



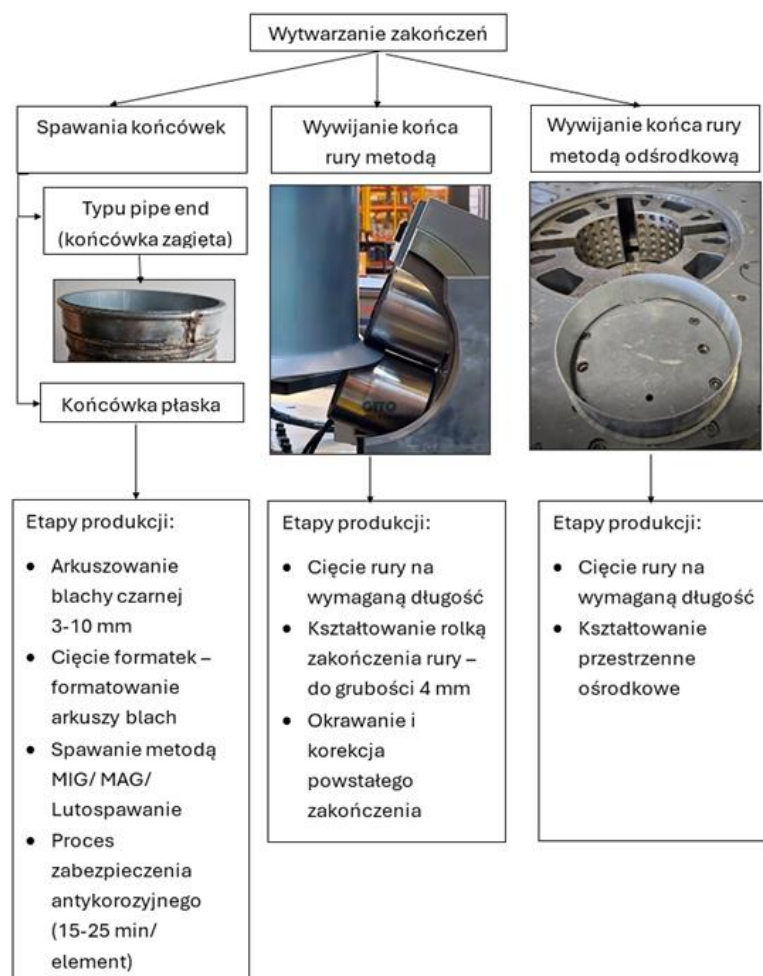
Streszczenie: Podstawą opracowania projektu plastycznego kształtowania zakończeń rur stalowych było zapotrzebowanie na poprawę jakości połączeń rurowych w dwóch podstawowych aspektach: estetycznym (jakość wizualna złącza) oraz funkcjonalnym (właściwości użytkowe połączenia). Analiza istniejących technologii wykazała fundamentalny konflikt między jakością produktu, efektywnością procesu a nakładami inwestycyjnymi, co uzasadniło opracowanie innowacyjnego rozwiązania eliminującego procesy spawalnicze. Zaprojektowana maszyna oparta na technologii plastycznego kształtowania odśrodkowego charakteryzuje się tolerancją wymiarową $\pm 0,5$ mm, czasem cyklu 3-6 min/szt. oraz zakresem średnic $\varnothing 155$ -450 mm. Rozwiązanie zapewnia redukcję czasu produkcji o 50-80% względem metod konwencjonalnych przy jednoczesnej eliminacji zużycia materiałów dodatkowych (0 kg/100 szt. vs 15-22 kg w spawaniu). Kluczowe zalety obejmują: zachowanie integralności powłok ochronnych, zerową emisję zanieczyszczeń procesowych oraz pełną automatyzację zgodną z koncepcją Przemysłu 4.0. Projekt zrealizowano w dwuetapowej metodyce przy wsparciu Funduszy Europejskich: 12-miesięczne badania przemysłowe oraz 14-miesięczne prace rozwojowe, osiągając 6. poziom gotowości technologicznej. Weryfikację założeń funkcjonalnych przeprowadzono w konsultacji z potencjalnymi użytkownikami z sektora przemysłu rolno-spożywczego i systemów wentylacyjnych. Badania eksperymentalne potwierdziły istotny wpływ jakości przygotowania materiału wyjściowego na geometrię produktu końcowego.

Słowa kluczowe: kształtowanie odśrodkowe, rury stalowe, automatyzacja produkcji, Przemysł 4.0, technologie bezodpadowe

ISTNIEJĄCE TECHNOLOGIE KSZTAŁTOWANIA ZAKOŃCZEŃ RUR STALOWYCH

W przemysłowej praktyce kształtowania zakończeń rur stalowych stosuje się różnorodne techniki technologiczne (Miller G.G., 2023), (Groover M. P., 2020), które sklasyfikowano na rys. 1.

Ocena dostępnych metod kształtowania zakończeń rur stalowych wymaga uwzględnienia parametrów technologicznych, ekonomicznych i jakościowych. Przeprowadzono systematyczne porównanie czterech podstawowych technologii: spawania kołnierzy, lutowania, profilowania obwodowego oraz kształtowania trójwymiarowego.



Rys. 1 Klasyfikacja metod wytwarzania zakończeń rur stalowych

Analiza istniejących technologii formowania rur (Miller G.G., 2023) wykazała fundamentalny konflikt między efektywnością procesu, jakością produktu a nakładami inwestycyjnymi w istniejących technologiach. Metody o niskich kosztach jednostkowych nie zapewniają wymaganej dokładności wymiarowej, podczas gdy technologie gwarantujące wysoką jakość wymagają bardzo wysokich nakładów kapitałowych. Zidentyfikowana luka technologiczna stanowi uzasadnienie dla opracowania innowacyjnego rozwiązania. Szczegółowe wyniki porównania przedstawiono w tabeli 1.

Rury z kołnierzem powstałym w wyniku plastycznego kształtowania wyrobów osiowosymetrycznych metodą wyoblania (Gądek T. i in., 2019), (Music O. i in., 2010) stosowane są w przemyśle do transportu materiałów sypkich (np. nasion zbóż) oraz w przemyśle wentylacyjnym. Znając obszar zastosowania rur, przeprowadzono analizę potrzeb potencjalnych klientów, co dało podstawę do powstania projektu wspartego ze środków Funduszy Europejskich.

Zidentyfikowane ograniczenia istniejących technologii stanowiły podstawę do sformułowania celu badawczego: “opracowanie metody automatycznego, precyzyjnego profilowania zakończeń rur stalowych, eliminującej procesy spawalnicze oraz minimalizującej uszkodzenia powłok ochronnych”.

Tabela 1 Kompleksowe porównanie technologii kształtowania zakończeń rur stalowych

Parametr	Spawanie kolnierzy	Lutospawanie	Profilowanie obwodowe	Kształtowanie 3D (odśrodkowe)
Charakterystyka procesu				
Liczba operacji głównych	5-6	4-5	2-3	1-2
Średnia liczba operacji międzyoperacyjnych	5	4	4	3
Czas cyklu [min]	15-25	18-30	8-12	3-6
Czas cyklu [min/szt.]	18-25	20-32	10-15	3
Parametry techniczne				
Zakres średnic [mm]	50-1000	80-500	100-600	50-300
Grubość ścianki [mm]	2-12	2-6	1-4	1-8
Uszkodzenia warstwy wierzchniej	nie	nie	tak (mikro-uszkodzenia powłoki cynkowej 15-45 μm)	tak
Nierównomierne odkształcenie	-	-	tak	nie
Przekraczanie założonej tolerancji	tak	tak	tak	nie
Aspekty ekonomiczne				
Nakłady inwestycyjne	średnie	wysokie	średnie	bardzo wysokie
Zużycie materiałów dodatkowych [kg/100 szt.]	15-22	8-12	-	-
Udział kosztów materiałowych [%]	35-42	28-35	18-24	20
Koszt robocizny [PLN/szt.]	45-65	38-55	22-35	-
Wymagania operacyjne				
Wymagane kwalifikacje operatora	spawacz z certyfikatem	spawacz + operator	operator podstawowy	operator podstawowy
Wymagane operacje dodatkowe	tak	tak	tak	nie

Realizacja celu wymagała opracowania konstrukcji maszyny oraz dedykowanego oprogramowania sterującego, zapewniającego pełną automatyzację cyklu produkcyjnego. Ze względu na charakter pracy narzędzia, do poprawnej realizacji procesu należało dobrać właściwy materiał trzpienia formującego. Materiałem

łączącym w sobie zadowalającą trwałość, odporność na ścieranie, twardość, łatwą formowalność poprzez obróbkę skrawaniem, dostępność oraz przystępną cenę jest stal szybkoćną (Krasowski B., 2021).

ZAŁOŻENIA KONSTRUKCYJNE I ETAPY ROZWOJU PROTOTYPU

Opracowane rozwiązanie opiera się na technologii plastycznego kształtowania (Pater Z., Samołyk G., 2013) odśrodkowego (Music O. i in., 2010), (Rentsch B. i in., 2015) z zastosowaniem wymiennego układu narzędziowego, obejmującego wymienne elementy kształtujące i krępujące oraz układ czujników położenia poszczególnych części roboczych. Materiałem poddanym procesom kształtowania odśrodkowego będzie stal: Niestopowa stal konstrukcyjna walcowana na gorąco zgodnie z DIN 10025, gatunek sali min S235JR, Re min > 235 MPA; Rm 360-510 MPa; A > 17% (Eurotubi S. r. l., 2023), (Fischer U., Heinzler M., 2018).

Kluczowe cechy konstrukcyjne zaproponowanego rozwiązania obejmują:

- Eliminację operacji spawalniczych – wytwarzanie kompletnego elementu w jednym cyklu technologicznym.
- Ochronę powierzchni – system kształtowania zapobiegający uszkodzeniu powłok ochronnych (cynkowych, malarskich).
- Precyzję geometryczną – zapewnienie tolerancji wymiarowych $\pm 0,5$ mm, gwarantujących szczelność połączeń.
- Automatyzację procesu – redukcję czasu cyklu do 3-6 min/element przy zachowaniu wysokiej powtarzalności.
- Bezodpadowość – eliminację strat materiałowych oraz emisji zanieczyszczeń (pyłów, gazów spawalniczych).
- Korekcję owalizacji materiału wejściowego – przywracanie nominalnych wymiarów półproduktu odkształconego podczas transportu.

Opracowane rozwiązanie charakteryzuje się parametrami technicznymi istotnymi z punktu widzenia jakości produktu końcowego oraz efektywności procesu produkcyjnego. Porównanie z technologiami konwencjonalnymi przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2 Parametry techniczne opracowanego rozwiązania

Parametr	Wartość/ Zakres	Porównanie z technologiami tradycyjnymi – spawanie
Dokładność kąta gięcia	$\pm 1^\circ$	$\pm 3-5^\circ$
Promień gięcia	0,5g*	nie dotyczy
Czas cyklu	3-6 min/szt.	18-25 min/szt.
Liczba operacji	1	5-6
Zużycie materiałów dodatkowych	0 kg/100 szt.	15-22 kg/100 szt.

*g - grubość ścianki rury

Osiągnięcie przedstawionych parametrów technicznych przekłada się na wymierne korzyści w obszarach ekonomicznym, jakościowym, ekologicznym oraz operacyjnym, które zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3 Korzyści opracowanego rozwiązania

Kategoria	Korzyści
Ekonomiczne	• Redukcja czasu wytwarzania o 50-80% • Eliminacja kosztów materiałów dodatkowych • Brak wymagań certyfikacyjnych spawaczy
Jakościowe	• Powtarzalność geometrii $\pm 0,5$ mm • Zachowanie powłok ochronnych • Szczelność połączeń bez dodatkowych uszczelnień
Ekologiczne	• Zerowa emisja gazów i pyłów spawalniczych • Brak odpadów produkcyjnych • Eliminacja hałasu procesu spawania
Operacyjne	• Automatyzacja sterowania • Prostota obsługi (operator podstawowy) • Elastyczność asortymentowa

Weryfikacja założeń funkcjonalnych, zgodnie z doświadczeniami wdrożeń przemysłowych procesów spinning (Rentsch B. i in., 2015) przeprowadzono w formie konsultacji z potencjalnymi użytkownikami technologii z sektora produkcji urządzeń dla przemysłu rolno-spożywczego oraz systemów wentylacyjnych. Zidentyfikowane potrzeby potwierdzają zasadność przyjętych kierunków rozwoju technologii, w szczególności w zakresie eliminacji operacji spawalniczych oraz zapewnienia wysokiej powtarzalności procesu w produkcji wielkoseryjnej. Do realizacji procesu projektowego przyjęto następujące średnice rur: Ø155, Ø195, Ø250, Ø300, Ø450 mm.

Projekt maszyny do automatycznego, precyzyjnego kształtowania zakończeń rur stalowych zrealizowano przy wsparciu środków z Funduszy Europejskich. Zgodnie z metodyką projektowania procesów technologicznych (Zych A., 2005) prace podzielono na dwa etapy:

- Etap I – badania przemysłowe (12 miesięcy)
- Etap II – prace rozwojowe (14 miesięcy)

Pierwszy etap o charakterze badań przemysłowych realizowano przez pierwsze 12 miesięcy projektu. Obejmował on serię badań i testów (Rentsch B. i in., 2015) oraz wytworzenie kilku wersji narzędzi metodą prób i błędów w celu osiągnięcia optymalnych kształtów dla rur o średnicach Ø155 i Ø195 mm.

Zakres prac pierwszego etapu obejmował:

- opracowanie koncepcji działania maszyny,
- projektowanie wstępnego modelu CAD 3D (Groover M. P., 2020), (Horajski P., 2024) wspartego symulacjami MES (Gądek T. i in., 2019) oraz konstrukcji narzędzi kształtujących (Pacanowski J., 2018),
- projekt systemu elektrycznego i hydraulicznego sterowania,
- produkcja podzespołów i ich montaż,
- wykonanie pierwszej wersji systemu komunikacji ze sterownikiem.

Rezultatem etapu było osiągnięcie 6. poziomu gotowości technologicznej (TRL 6), rys. 2.



Rys. 2 Maszyna do felcowania rur

Drugi etap o charakterze prac rozwojowych realizowano przez kolejne 14 miesięcy. Celem było rozszerzenie gamy produktów poprzez opracowanie i wykonanie elementów dla pozostałych, większych średnic rur ($\varnothing 250$, $\varnothing 300$, $\varnothing 450$ mm) oraz adaptację konstrukcji maszyny do nowych wymiarów.

Zakres prac drugiego etapu obejmował:

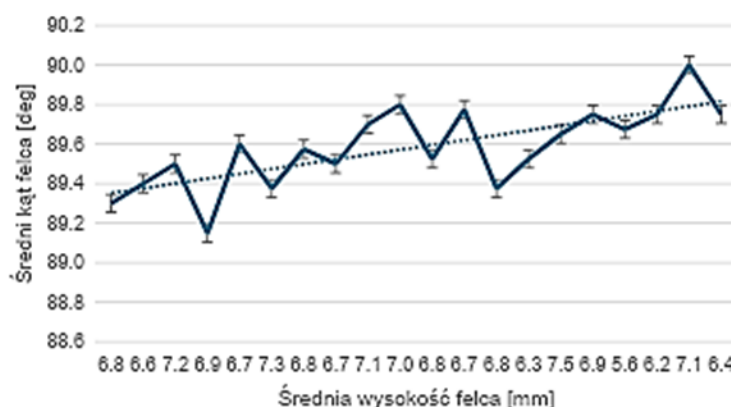
- produkcję i montaż drugiego prototypu (analogicznego do pierwszego, lecz dostosowanego do większych średnic),
- opracowanie i produkcję elementów dodatkowych (osłon, systemów mocowania),
- opracowanie programu konfiguratora z interfejsem użytkownika wykorzystującego systemy CAx (Horajski P., 2024) zgodnie z koncepcją Przemysłu 4.0,
- dobór narzędzi dla średnic $\varnothing 250$, $\varnothing 300$ i $\varnothing 450$ mm (rys. 3) z uwzględnieniem zasad projektowania narzędzi do kształtowania wyrobów osiowoosymetrycznych (Pacanowski J., 2018).

Opracowana maszyna umożliwia kształtowania końca rury w układzie poziomym i pionowym (rys. 3). Maszyna, umożliwia wykonanie felca na krawędzi rury o wysokości minimum 7 mm przy odpowiednio przygotowanej krawędzi prefabrykatu, tzn. krawędź rury jest wykonana pod kątem 90° do osi rury.



Rys. 3 Układ roboczy maszyny (po lewej) i odkształcona rura $\varnothing 50$ mm (po prawej)

Proces kształtowania można realizować dla rur o różnej długości. Minimalna długość rury poddawanej procesowi kształtowania odśrodkowego wynosi 0,05 m (rys. 4), maksymalna długość rury wynosi 6 m.



Rys. 4 Zależność średniego kąta felca od średniej wysokości felca

OSIĄGNIĘTE PARAMETRY I FUNKCJONALNOŚCI

Celem projektu było opracowanie maszyny wykonującej zakończenie rury prostopadłe do jej osi. Przeprowadzona seria badań wykazała, że osiągnięcie oczekiwanej geometrii zakończenia (kołnierza) jest procesem złożonym (Pater Z., Samołyk G., 2013), wymagającym odpowiedniego przygotowania materiału wyjściowego oraz uwzględnienia właściwości mechanicznych stali (Kłysz S., 2015).

Wyniki badań pokazują jak jakość wykonania krawędzi rury wpływa na kąt i wysokość wykształconego felca. Badane próbki były wykonywane w technologii cięcia piłą taśmową. Stosowanie tej technologii powoduje odkształcenia rury już na etapie cięcia, a powstała krawędź nie daje prostopadłej płaszczyzny cięcia do osi rury.

Przedstawione w artykule rozwiązanie stanowi wkład w rozwój technologii kształtowania plastycznego elementów rurowych, eliminując kluczowe ograniczenia metod konwencjonalnych. Osiągnięto redukcję liczby operacji z 5-6 do jednej przy jednoczesnym wzroście dokładności wymiarowej i skróceniu czasu cyklu produkcyjnego.

Opracowana metodyka projektowania uwzględniająca konsultacje z potencjalnymi użytkownikami oraz dwuetapowa realizację (badania przemysłowe – prace rozwojowe) pozwoliła na weryfikację założeń funkcjonalnych i technicznych. Rezultatem jest prototyp maszyny z wymiennym układem narzędziowym, systemem czujników położenia oraz dedykowanym oprogramowaniem sterującym zgodnym z koncepcją Przemysłu 4.0.

Przeprowadzone badania eksperymentalne wykazały złożoność procesu kształtowania odśrodkowego oraz konieczność precyzyjnego przygotowania materiału wyjściowego. Zidentyfikowano wpływ jakości krawędzi cięcia na parametry geometryczne wykształconego kołnierza, co stanowi podstawę do dalszych prac optymalizacyjnych.

Dodatkowo na podstawie eksperymentalnych prac M.S. Ragab i N. Sommer (Pacanowski J., 2018), oraz S. Ali, S. Hinduja, J. Atkinson, P. Bolt, R. Werkhoven dotyczących operacji głębokiego tłoczenia z zastosowaniem dociskacza

pulsacyjnego, A. Wifi i A. Mosallam oraz własnych prac eksperymentalnych stwierdzono/wykazano, że: luz pomiędzy dociskaczem a poduszką (skok pulsowania), wysokość poduszki (skoku), szczelina między dociskaczem, a materiałem wyjściowym, amplituda pulsacji nacisku dociskacza mają zasadniczy wpływ na jakość i kształt modelowanych detali/zakończeń (Drenger T., Pawlicki M., 2011).

LITERATURA

- Drenger, T., Pawlicki, M. (2011). Nowoczesne systemy docisku blachy w procesie tłoczenia. *Obróbka Plastyczna Metali*, 22(2), 83-109.
- Eurotubi, S. (2023). Test raport UNI EN 10204. Włochy Eurotubi S. r. l.
- Fischer, U., Heinzler, M. (2028). *Poradnik mechanika*. Warszawa: Wydawnictwo REA.
- Gądek, T., Majewski, M., Nowacki, Ł., Drenger, T. (2019). Badania kształtowania wyrobów symetrycznych metodą wyoblania wsparte symulacjami MES. *Obróbka Plastyczna Metali*, 30(4), 273–290.
- Groover, M.P. (2020). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*, (7th ed.). Hoboken: Wiley.
- Horajski, P. (2024). Cold forming of steel - selected processes, issues, and CAx. *Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji*, 13(1), 41-54.
- Kłysz, S. (2015). *Podstawy wytrzymałości materiałów*. Warszawa: Wydawnictwo instytutu technicznego wojsk lotniczych.
- Krasowski, B. (2021). Rozprawa doktorska. Analiza procesu kształtowania przyrostowego usztywnień w cienkościennych konstrukcjach nośnych wykonanych ze stopów aluminium EN AW-2024-T3 oraz EN AW-7075-T6. Rzeszów: Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza.
- Miller, G.G. (2003). *Tube Forming Processes: A Comprehensive Guide*. Dearborn: Society of Manufacturing Engineers.
- Music, O., Allwood, J. M., & Kawai, K. (2010). A review of the mechanics of metal spinning. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(1), 3-23.
- Pacanowski, J. (2018). Projektowanie procesów ciągnienia wytłoczek kołowo-symetrycznych i konstrukcji tłoczników. Tom I. Metody i zasady ciągnienia wytłoczek kołowo-symetrycznych. Kielce: Politechnika Świętokrzyska.
- Pater, Z., Samołyk, G. (2013). *Podstawy technologii obróbki plastycznej metali*. Lublin: Politechnika Lubelska.
- Rentsch, B., Manopulo, N., Hora, P. (2025). Numerical modelling and validation of conventional sheet metal spinning processes in industrial application. *Proceedings of the IDDRG 2015*. Shanghai, China.
- Zych, A. (2005). *Projektowanie procesów technologicznych. Poradnik dla ucznia*. Radom: Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy.

Innovative waste-free technology for centrifugal forming of steel pipe ends – from concept to industrial prototype

Abstract: The basis for developing the plastic forming project for steel pipe ends was the need to improve the quality of pipe connections in two fundamental aspects: aesthetic (visual quality of the joint) and functional (operational properties of the connection). Analysis of existing technologies revealed a fundamental conflict between product quality, process efficiency, and investment costs, which justified the development of an innovative solution eliminating welding processes. The designed machine, based on centrifugal plastic forming technology, is characterized by dimensional tolerance of ± 0.5 mm, cycle time of 3-6 min/piece, and diameter range of $\varnothing 155$ -450 mm. The solution provides a 50-80% reduction in production time compared to conventional methods while eliminating the consumption of additional materials (0 kg/100 pcs. vs. 15-22 kg in welding). Key advantages include: preservation of protective coating integrity, zero process emission pollution, and full automation in accordance with the Industry 4.0 concept. The project was implemented using a two-stage methodology with European Funds support: 12-month industrial research and 14-month development work, achieving Technology Readiness Level 6. Verification of functional assumptions was conducted in consultation with potential users from the agri-food industry and ventilation systems sectors. Experimental studies confirmed the significant impact of raw material preparation quality on the final product geometry.

Keywords: spin forming, steel tubes, manufacturing automation, Industry 4.0, zero-waste technologies

Marcin Świątek

Expert Solutions Sp. z o. o.
ul. Długosza 15/6, 51-162 WROCŁAW, Poland

Darya Kavaleuskaya

Expert Solutions Sp. z o. o.
ul. Długosza 15/6, 51-162 WROCŁAW, Poland
e-mail: dkowalewska@exso.pl