

Development and verification of an automated pipe profiling machine with Industry 4.0 configurator

Opracowanie i weryfikacja zautomatyzowanej maszyny do profilowania rur z konfiguratorem Industry 4.0

MARCIN ŚWIĄTEK
DARYA KAVALEUSKAYA *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2026.2.4>

An innovative modular machine for centrifugal forming of steel pipe ends ($\varnothing 155\text{--}450\text{ mm}$) was presented, developed within a research and development project supported by European Funds. The limitations of existing technologies were eliminated: long welding time (18–30 min/unit), coating damage, or high capital requirements ($>€500,000$). The designed machine with interchangeable tooling elements and Industry 4.0 configurator utilizes hydraulic actuators ($\varnothing 160/100\text{ mm}$) and optimized mandrel angle (12°). The EXSO configurator provides automatic parameterization, 3D visualization, and MES/ERP integration, reducing fulfillment time by 60–75% and changeover to $<5\text{ min}$. The prototype achieved TRL 9. Experimental verification revealed significant influence of input material imperfections (cutting deviations $\pm 2\text{--}4^\circ$, ovalization 3 mm) on flange geometry. Achieved parameters: tolerance $\pm 0.8\text{--}1.2\text{ mm}$, cycle 4.5–7.5 min/unit, coating preservation 95–98%. The solution ensures production flexibility at capital costs 75% lower than imported technologies.

KEYWORDS: centrifugal forming, modular design, steel pipe ends, TRL 9, configurator system, control automation

Przedstawiono innowacyjną modułową maszynę do kształtowania odśrodkowego zakończenia rur stalowych ($\varnothing 155\text{--}450\text{ mm}$), opracowaną w ramach projektu badawczo-rozwojowego przy wsparciu Funduszy Europejskich. Eliminowano ograniczenia istniejących technologii: długi czas spawania (18–30 min/szt.), uszkodzenie powłok lub wysokie nakłady ($> 500\,000\text{ EUR}$). Zaprojektowana maszyna z wymiennymi elementami narzędziowymi oraz konfiguratorem Industry 4.0 wykorzystuje siłowniki hydrauliczne ($\varnothing 160/100\text{ mm}$) i zoptymalizowany kąt trzpienia (12°). Konfigurator EXSO zapewnia automatyczną parametryzację, wizualizację 3D i integrację z MES/ERP, redukując czas realizacji o 60–75% i przedstawienia do $< 5\text{ min}$. Prototyp osiągnął TRL 9. Weryfikacja eksperymentalna wykazała istotny wpływ niedoskonałości materiału wejściowego (odchyłki cięcia $\pm 2\text{--}4^\circ$, owalizacja 3 mm) na geometrię felca. Osiągnięte parametry: tolerancja $\pm 0,8\text{--}1,2\text{ mm}$, cykl 4,5–7,5 min/szt., zachowanie powłok 95–98%. Rozwiązanie zapewnia elastyczność produkcyjną przy nakładach o 75% niższych niż technologie importowane.

SŁOWA KLUCZOWE: kształtowanie odśrodkowe, modułowa konstrukcja, zakończenia rur stalowych, TRL 9, system konfiguratora, automatyzacja sterowania

Ograniczenia istniejących technologii i innowacyjne rozwiązanie

Rury stalowe z kształtowanymi zakończeniami są podstawowym elementem systemów transportu materiałów sypkich i wentylacji. Wymagane jest zapewnienie szczelności połączeń przy zachowaniu integralności powłok ochronnych.

Tradycyjne metody – spawanie, lutowanie (rys. 1) – charakteryzują się długim czasem cyklu (18–30 min/szt.), wysokim zużyciem materiałów dodatkowych (15–22 kg/100 szt.) oraz koniecznością wykwalifikowanych spawaczy. Metody obróbki plastycznej eliminują część problemów [8], lecz metody niskokosztowe są niedokładne ($> \pm 2\text{ mm}$) i uszkadzają powłoki, a wysokiej jakości wymagają nakładów $> 500\,000\text{ EUR}$, niedostępnych dla MŚP.

Zrealizowano projekt badawczo-rozwojowy „Opracowanie prototypu innowacyjnej maszyny do automatycznego, precyzyjnego profilowania zakończeń rur stalowych” przy wsparciu Funduszy Europejskich. Celem było opracowanie metody kształtowania od-

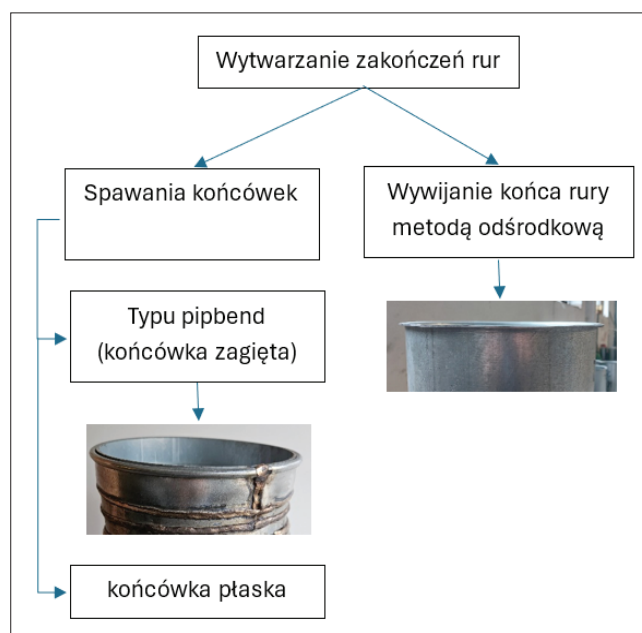


Fig. 1. Classification of steel pipe end manufacturing methods
Rys. 1. Klasyfikacja metod wytwarzania zakończeń rur stalowych

* Mgr inż. Marcin Świątek – m.swiatek@expert-solutions.pl Expert Solutions Sp. z o.o., Wrocław, Polska
lic. Darya Kavaleuskaya – dkowalewska@expert-solutions.pl, <https://orcid.org/0009-0002-0927-8896> – Expert Solutions Sp. z o.o., Wrocław, Polska

środkowego i maszyny o parametrach: tolerancja $\pm 0,5$ mm, czas ≤ 6 min/szt., zakres $\varnothing 155\text{--}450$ mm, eliminacja materiałów dodatkowych, zachowanie powłok, elastyczność asortymentowa ($\varnothing 155\text{--}450$ mm) oraz nakłady dostępne dla MŚP.

Projekt przeprowadzono w dwóch etapach (TRL 1–6 i TRL 6–9): opracowanie modelu obliczeniowego, projektowanie konstrukcji układów roboczych i prototypu dla średnic $\varnothing 155\text{--}195$ mm, następnie rozszerzenie zakresu średnic oraz wdrożenie systemu sterowania.

Modułowa koncepcja konstrukcyjna i zintegrowany system sterowania

Opracowanie konstrukcji maszyny wymagało sformułowania modelu obliczeniowego do określenia sił kształtowania i doboru komponentów hydraulicznych. Model oparto na odkształceniu plastycznym metalu [1] z obciążeniem momentem rozłożonym równomiernie na obwodzie rury [7].

Materiałem wejściowym była stal S235JR ($R_e \geq 235$ MPa; $R_m = 360\text{--}510$ MPa; $A \geq 7\%$) wg DIN 10025 [9, 10]. Przyjęto założenia upraszczające: prostota cięcia (90°), brak owalizacji, brak odkształceń wstępnych i idealną powierzchnię.

Proces podzielono na 3 etapy [5], określając sekwencję odkształceń. Koncepcja uwzględnia rury długie (do 6 m) i krótkie (min. 0,05 m) – rys. 2.

W trakcie pierwszego etapu opracowano zasadę pracy układu kształtującego i układu kępującego.

Zasada pracy układu kształtującego polega na ruchu osiowym trzpienia zamocowanego do siłownika hydraulicznego, który wymusza rozchylenie elemen-

tów kształtujących w kierunku promieniowym, powodując odkształcenie krawędzi rury (rys. 3).

W wyniku obliczeń inżynierskich dobrano niezbędne podzespoły konstrukcyjne. Przeprowadzona analiza wykazała, że kluczowym parametrem wpływającym na siły w procesie kształtowania krawędzi rury jest kąt wierzchołkowy trzpienia kształtującego (rys. 4a). Na podstawie obliczeń optymalizacyjnych określono optymalny kąt wierzchołkowy trzpienia na poziomie 12° .

Elementy kształtujące wykonano w systemie modułowym, obejmującym:

- część bazową (niewymienną), zamocowaną do trzpienia,
- część dedykowaną (wymenną), dopasowaną do konkretnej średnicy kształtowanej rury.

Rozwiązanie modułowe zapewnia elastyczność asortymentową maszyny przy minimalnym czasie przestawienia produkcji na inną średnicę rury (rys. 4b).

Układ kępujący stabilizuje rurę i kompensuje siły rozprężające przez odkształcenie ściskające w kierunku promieniowym, przeciwdziałające owalizacji (rys. 3).

Elementy kępujące zaprojektowano w systemie modułowym analogicznym do układu kształtującego:

- elementy bazowe zamocowane na stałe do siłowników hydraulicznych,
- elementy wymienne dedykowane (dopasowane do) średnicy obrabianej rury.

Realizacja koncepcji Przemysłu 4.0 wymagała opracowania systemu informatycznego integrującego parametryzację z automatycznym sterowaniem na podstawie inżynierii systemów [13]. Kompleksowe rozwiązanie zaprojektował zespół EXSO, specjalizujący się w CAX i automatyzacji.

Konfigurator eliminuje programowanie maszyny przez operatora – użytkownik definiuje parametry przez intuicyjny interfejs graficzny, a system automatycznie przetwarza je na parametry sterowania, eliminując opracowywanie technologii dla każdego zamówienia.

Realizacja przebiegała dwuetapowo: Etap I – prototyp komunikujący ze sterownikiem, Etap II – pełna funkcjonalność konfiguratora z interfejsem CAX (Hojrajski P., 2024). Konfigurator stanowi zintegrowany element sterownika, który umożliwia kompleksowe zarządzanie procesem produkcyjnym.

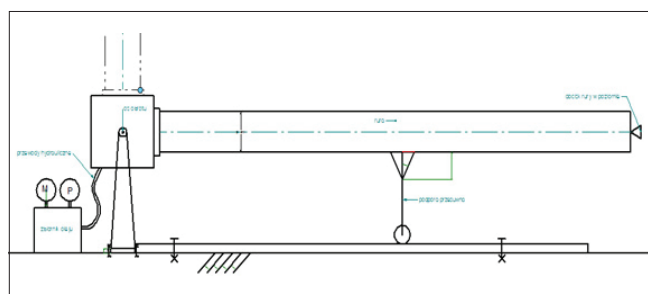


Fig. 2. Machine concept for processing long and short pipes
Rys. 2. Koncepcja maszyny do obróbki rur długich i krótkich

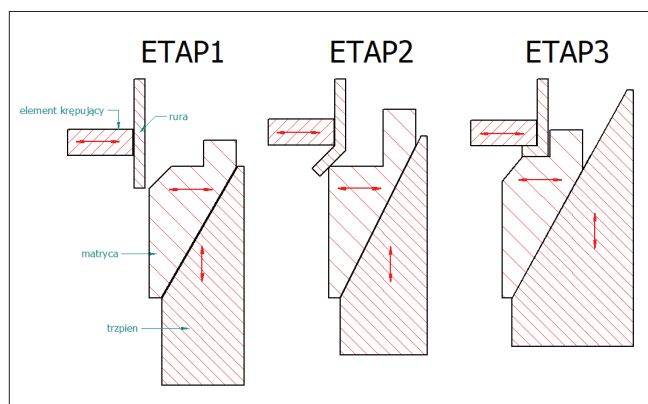


Fig. 3. Operating principle of the forming and restraining system
Rys. 3. Zasada pracy układu kształtującego i układu kępującego

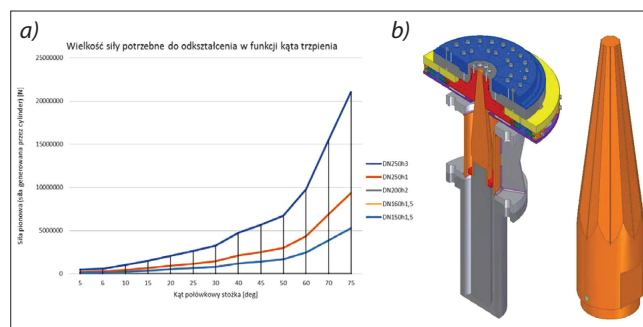


Fig. 4. a) forming force vs. mandrel angle relationship, b) modular forming assembly
Rys. 4. a) zależność siły kształtowania od kąta trzpienia, b) układ kształtujący modułowy

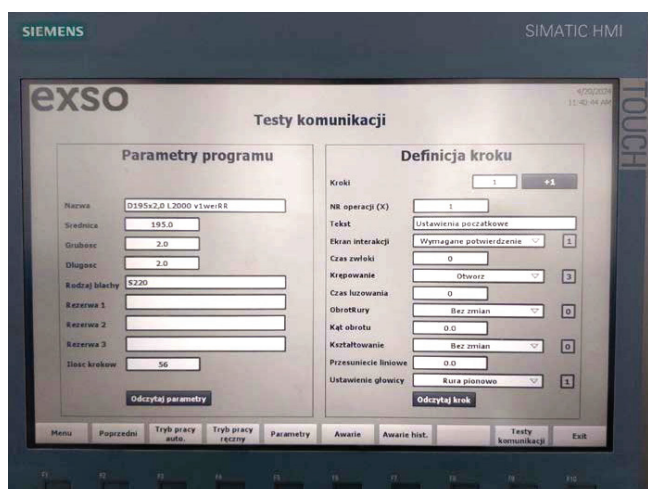


Fig. 5. EXSO configurator system interface with process parameterization panel

Rys. 5. Interfejs systemu konfiguratora EXSO z panelem parametryzacji procesu

Zastosowanie zautomatyzowanego systemu EXSO zapewnia redukcję czasu realizacji o 60–75%, czas przestawienia < 5 min, uproszczenie wymagań operatora oraz wysoką powtarzalność geometrii (tolerancja kąta $\pm 1^\circ$, promień $r = 0,5$ g). Oprogramowanie umożliwia integrację z MES/ERP przez OPC UA i REST API, realizując dwukierunkową wymianę danych w czasie rzeczywistym (rys. 5).

Realizacja prototypu, weryfikacja eksperymentalna i wdrożenie przemysłowe

W wyniku prac powstała maszyna z modułowymi układami kształtującym i krępującym o napędzie hydraulicznym, zintegrowana z czujnikami położenia i modułowym oprogramowaniem sterującym. Rozwiązanie umożliwia zdalny dostęp do maszyny i monitoring w czasie rzeczywistym zgodnie z Przemysłem 4.0 (rys. 6a). Maszyna osiągnęła TRL 9, oznaczający pełną zdolność produkcyjną i gotowość komercyjną.

W ramach doskonalenia konstrukcji wprowadzono hamulec pneumatyczny (rys. 6b), poprawiając stabilność i precyzję pozycjonowania rury. System kompensacji owalizacji z algorytmem automatycznej korekcji parametrów kształtowania w czasie rzeczywistym

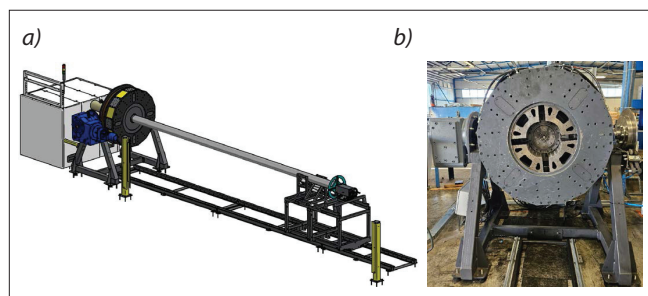


Fig. 6. a) realized machine for centrifugal forming of steel pipe ends, b) pneumatic brake as an innovative element for improving working assembly stability

Rys. 6. a) zrealizowana maszyna do kształtowania odśrodkowego zakończeń rur stalowych, b) hamulec pneumatyczny jako innowacyjny element poprawy stabilności układu roboczego

oraz dodatkowy układ hamujący poprawił precyzję pozycjonowania, zmniejszył drgania i zwiększył powtarzalność geometrii felca.

Celem było opracowanie maszyny do prostokątnego kształtowania zakończeń rury. Seria badań wykazała złożoność procesu, wymagającego odpowiedniego przygotowania materiału wyjściowego [1], [11]. Weryfikacja eksperymentalna wykazała istotne rozbieżności między modelem a rzeczywistością – założenia upraszczające o idealnej geometrii materiału okazały się nadmiernie optymistyczne.

Osiągnięte parametry techniczne maszyny potwierdziły realizację celów projektu. Modułowa konstrukcja ($\varnothing 155$ –450 mm) zapewniła elastyczność asortymentową przy krótkim czasie przestawienia produkcji, eliminując konieczność posiadania maszyn dedykowanych dla każdego zakresu średnic.

Rezultatem jest prototyp z modułowym układem narzędziowym i oprogramowaniem zgodnym z Przemysłem 4.0 w duchu modułowej architektury systemów Industry 4.0 [13]. Sukces zapewnia koncepcja łącząca mechanikę z IT przy zachowaniu niskich nakładów finansowych.

LITERATURA

- [1] Pater Z., Samołyk G. „Podstawy technologii obróbki plastycznej metali”. Lublin: Politechnika Lubelska, 2013.
- [2] Zych A. „Projektowanie procesów technologicznych. Poradnik dla ucznia”. Radom: Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, 2005.
- [3] Rentsch B., Manopulo N., Hora P. „Numerical modelling and validation of conventional sheet metal spinning processes in industrial application”. Proceedings of the ID-DRG 2015. Shanghai, China, 2015.
- [4] Horajski P. „Cold forming of steel – selected processes, issues, and CAX”. Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji. 2024; 13(1): s. 41–54.
- [5] Gądek T., Majewski M., Nowacki Ł., Drenger T. „Badania kształtowania wyrobów symetrycznych metodą wyoblania wsparte symulacjami MES”. Obróbka Plastyczna Metali. 2019; 30 (4): s. 273–290.
- [6] Pacanowski J. „Projektowanie procesów ciągnięcia wytłoczek kołowo-symetrycznych i konstrukcji tłoczników. Tom I. Metody i zasady ciągnięcia wytłoczek kołowo-symetrycznych”. Kielce: Politechnika Świętokrzyska, 2018.
- [7] Niezgodziński M.E., Niezgodziński T. „Wzory, wykresy i tablice wytrzymałościowe”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2017.
- [8] Music O., Allwood J.M., & Kawai K. „A review of the mechanics of metal spinning”. Journal of Materials Processing Technology, R. 210, z 1 (2010), s. 3–23.
- [9] Eurotubi S. r. l. „Test raport UNI EN 10204”. Włochy: Eurotubi S. r. l., 2023.
- [10] Fischer U., Heinzler M. „Poradnik mechanika”. Warszawa: Wydawnictwo REA, 2008.
- [11] Kłysz S. „Podstawy wytrzymałości materiałów”. Warszawa: Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, 2015.
- [12] Kagermann H., Wahlster W., Helbig J. „Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0”. Frankfurt: Forschungsunion, 2013.
- [13] Kenett R.S., Swarz R.S., Zonnenshain A. „Systems Engineering in the Fourth Industrial Revolution: Big Data, Novel Technologies, and Modern Systems Engineering”. Hoboken: Wiley, 2020.